МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

Ю. Г. ГОРОХОВ, Л. Н. НЕПЛЮЕВ

ГОЛОГРАФИЯ В ПРИБОРАХ И УСТРОЙСТВАХ



МАССОВАЯ
РАДИОБИБЛИОТЕКА

Вып. 863

Ю. Г. ГОРОХОВ, Л. Н. НЕПЛЮЕВ

ГОЛОГРАФИЯ В ПРИБОРАХ И УСТРОЙСТВАХ



«ЭНЕРГИЯ» • МОСКВА • 1974

6ФО.3
Г 70
УДК 535.4



Горохов Ю. Г. и Неплюев Л. Н.

Г 70 Голография в приборах и устройствах. М., «Энергия», 1974.

80 с. с ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 863).

В книге популярно объясняются принципы голографии и фильтрации пространственных частот; рассматриваются вопросы применения голографии в науке и технике.

Книга рассчитана на широкий круг радиолюбителей.

Г $\frac{30401\text{-}555}{051(01)-74}$ 291—74 6ФО.3

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одним из наиболее замечательных открытий в физике за последнюю четверть века можно считать разработанный в 1947 г. английским ученым Д. Габором метод записи и восстановления пространственной структуры световой волны (волнового фронта), который получил название голографии. Опираясь на последние достижения оптики, спектроскопии, радиолокации, теории связи, Габор предложил записывать изображение объекта в виде интерференционной картины. При этом на фотопластинке фиксируется свет, отраженный этим объектом при освещении его пучком когерентного света. Осветив затем такую фотопластинку (голограмму) пучком когерентного света, можно увидеть (восстановить в пространстве) объемное изображение объекта. Однако первые голограммы, полученные Габором, давали изображения весьма невысокого качества. Это объяснялось главным образом тем, что в распоряжении Габора не было необходимых источников когерентного света. Идея Габора оказалась несколько преждевременной, и голография в то время не получила широкого развития.

В 1962 г. советский ученый Ю. Н. Денисюк разработал и осуществил оригинальный метод записи голограмм на толстослойную фотоэмульсию. Изготовленная этим методом голограмма позволяет восстановить объемное (причем даже и цветное) изображение предмета при освещении ее любым некогерентным источником: солнечным светом, лампой накаливания и др.

В начале 60-х годов с появлением лазеров произошло как бы второе рождение голографии. В 1963 г. американские физики Е. Лейт и Ю. Упатниекс получили первые лазерные голограммы. Применив схему с разделением световых пучков, они получили при восстановлении изображения высокого качества со всеми эффектами объемности, как это предсказывал Д. Габор в своих первых работах. Таким образом, опыты Лейта — Упатниекса и Денисюка явились экспериментальной основой современной голографии и, начиная с этого момента, наступил период ее бурного развития как самостоятельной области физики. Одновременно голография все в большей степени стала проникать в различные области науки и техники.

Замечательное свойство голограмм давать высококачественные объемные изображения предметов открывает новые возможности в технике фотографии, создает предпосылки для разработки систем голографического кино и телевидения. Возможность записи на голограмму огромного количества информации, содержащейся в световой волне, привела к появлению ряда проектов создания вычислительных устройств с быстродействием в тысячи раз большим, чем у существующих ЭВМ, а также запоминающих устройств сверхбольшой емкости. В радиочастотном диапазоне голография применяется для создания систем радиовидения, а также в ряде случаев для улучшения

параметров РЛС. Голографические методы успешно используются при решении задач выделения сигналов из шумов и распознавания образов. Голография позволяет увеличивать изображения во много раз больше, чем это можно сделать с помощью оптических линз, измерять микроскопические перемещения сложных поверхностей и многое другое.

Не следует, однако, думать, что в голографии уже решены все проблемы и создание конкретных голографических устройств — дело довольно простое. Отнюдь нет! На пути практического применения голографии встречается ряд серьезных технических трудностей, так что ученым и инженерам при разработке тех или иных голографических устройств часто приходится идти сложными и даже окольными путями. Однако возможности голографии настолько заманчивы, что все эти трудности, несомненно, будут преодолены.

Основная цель настоящей книги — ознакомить массового читателя с возможностями практического применения голографии в различных областях науки и техники. Естественно, что в столь небольшой по объему книге невозможно отразить все многообразие голографических устройств и приборов. Поэтому авторы ограничились рассмотрением применения голографии в таких областях, как фото- и кинотехника, телевидение, вычислительная техника, интерферометрия, а также остановились на некоторых вопросах радиоголографии и голографии в акустическом диапазоне волн. В начале книги читатель найдет краткие сведения о физических основах голографии, которые помогут ему при чтении последующих глав.

ГОЛОГРАФИЯ. ЧТО ЭТО ТАКОЕ?

Принцип голографии

Большую часть информации об окружающем мире человек получает с помощью зрения. Известно, что глаз человека представляет собой оптическую систему, состоящую из собирающей линзы-хрусталика и светочувствительной поверхности — сетчатки. Отраженный от какого-нибудь предмета свет попадает в зрачок глаза, и линза-хрусталик образует на сетчатке изображение этого предмета. За свою многовековую историю человек изобрел большое количество различных оптических приборов и систем, предназначенных для получения, передачи и хранения изображений, и все они обязательно включали в себя линзу или систему линз — объектив.

Одним из наиболее мощных средств получения информации об окружающих нас предметах вот уже более 100 лет является фотография, метод получения изображений объектов на фотопластинке с помощью объектива. Основное назначение объектива — собрать все попадающие в него лучи света, которые исходят из некоторой элементарной точки объекта, в соответствующую ей точку на фотопластинке. После проявления фотопластинки изображение предмета можно увидеть, рассматривая фотопластинку при обычном освещении на просвет или отражение или перенеся это изображение на светочувствительную бумагу.

Однако всю ли информацию о предмете содержит полученный фотоснимок? Оказывается, нет. Рассматривая фотографическое изображение незнакомого предмета, мы ничего не можем сказать о его объемных свойствах. Другими словами, если мы более или менее правильно можем определить относительные линейные размеры предмета — его ширину и высоту, то протяженность предмета в глубину, а тем более расстояние от предмета до объектива фотоаппарата определить невозможно. Эта потеря информации происходит вследствие того, что фотопластинка реагирует только на среднюю интенсивность света при экспонировании и не способна реагировать на фазу световой волны, которая зависит от расстояния между предметом и фотопластинкой.

Возникает вполне естественный вопрос: а нельзя ли каким-либо способом зафиксировать всю информацию о предмете? На этот вопрос ответил Д. Габор — изобретатель голографии. Он обратил внимание на то, что при фотографировании предмета всегда приходится осуществлять наводку на резкость, иначе изображение будет нечетким, а то и вовсе может отсутствовать. Между тем, независимо от наводки на резкость, лучи света, образующие изображение на фотопластинке, на участке между объективом и фотопластинкой никуда не исчезают и к ним не добавляются новые. Разбираясь в этом парадоксе, Габор предположил, что изображение предмета присутствует в скрытом от наблюдателя виде в любой плоскости между

объективом и фотопластинкой. Иначе говоря, изображение в том или ином виде содержится в самой структуре световой волны, распространяющейся от предмета к объективу фотоаппарата. Это утверждение непосредственно следует из хорошо известного принципа Гюйгенса — Френеля, согласно которому волна, излученная источником или отраженная от предмета, больше не зависит от них и распространяется в пространстве как бы сама по себе.

Каким же образом волна может нести в себе информацию о предмете? Рассмотрим простейший случай — синусоидальную (монохроматическую) волну, распространяющуюся в одном направлении. Тогда в любой момент времени t картина волны будет иметь вид синусоиды с соответствующими данной волне параметрами f (частота излучения) и T (период колебаний). Если же теперь взять какую-либо фиксированную точку на пути распространения волны и рассмотреть изменение амплитуды волны в этой точке со временем, то мы увидим, что эта амплитуда изменяется также по синусоидальному закону с тем же периодом колебаний T. Для того чтобы описать волновой процесс одновременно во времени и пространстве, достаточно представить себе, что синусоидальная волна движется параллельно самой себе вдоль какой-либо оси. При этом, очевидно, достаточно рассматривать движение какой-либо точки на этой кривой, которая будет характеризоваться двумя параметрами: амплитудой и фазой, величины которых зависят от расстояния от выбранной точки до источника излучения.

Предположим теперь, что в пространстве расположен точечный монохроматический источник, испускающий волны равномерно во всех направлениях. В этом случае в любом направлении от источника волновой процесс будет описываться одной и той же синусоидальной кривой. Чтобы охарактеризовать распространение этих волн в пространстве, необходимо рассмотреть движение уже не одной точки, а целого семейства точек, расположенных на одинаковом расстоянии от источника излучения, т. е. точек, в которых все волны имеют одну и ту же фазу. Поверхность, образуемая в пространстве этими точками, называется волновым фронтом. Волновые фронты точечного источника, излучающего равномерно во все стороны, имеют форму концентрических сфер (в плоскости они будут выглядеть как концентрические окружности), распространяющихся от источника со скоростью v, и соответственно этому по мере удаления от источника увеличивается радиус этих сфер. Следовательно, определив в какой-либо точке пространства кривизну волнового фронта, мы в принципе можем определить расстояние до источника излучения.

Если на пути распространения световой волны оказывается какой-либо предмет, то волновой фронт искажается. Вследствие внесенного предметом рассеяния света волны, идущие от разных точек освещаемого предмета, будут иметь различные амплитуды и фазы. В этих амплитудных и фазовых искажениях волнового фронта и заключена информация о форме предмета, в том числе и его объемное изображение. Используя эти предпосылки, Габор предложил вместо изображения предмета регистрировать пространственную структуру самой волны света, т. е. несущий информацию о предмете волновой фронт, а затем на втором этапе, используя эту запись, восстанавливать изображение предмета. Этот двухступенчатый процесс записи и восстановления волнового фронта, несущего информацию о предмете, и называется **голографией**, а зафиксированная пространственная структура световой волны — **голограммой**.

Каким же образом можно зафиксировать и амплитуду и фазу световой волны? Поставить на пути волны фотопластинку, как мы уже говорили, нельзя, так как немедленно будет утеряна вся информация о фазе. Попытки использовать для этой цели другие материалы или приборы также оказываются безуспешными, поскольку реакция любого приемника света (фотоумножителя, фотодиода, фототранзистора и даже человеческого глаза) определяется величиной средней интенсивности света. Однако решение этой задачи оказалось неожиданно очень простым. Габор предложил использовать для записи голограммы интерференцию двух когерентных пучков света, а для восстановления изображения с голограммы — явление дифракции света.

Интерференция и дифракция света — физические основы голографии

В предыдущем разделе мы рассмотрели, какой будет волновая картина при наличии одного источника сферических волн. Предположим теперь, что на некотором расстоянии от этого источника находится второй источник, испускающий сферические волны с той же частотой и амплитудой. В этом случае волны от двух источников в любой точке пространства будут накладываться друг на друга, причем в некоторых местах произойдет удвоение амплитуды, а в некоторых амплитуда колебаний окажется равной нулю (рис. 1). Сплошными линиями на рис. 1 обозначены области, где суммарная амплитуда колебаний имеет удвоенное значение (*2A*), пунктирными — где амплитуда колебаний равна нулю. В любой другой точке амплитуды будут иметь промежуточные значения. Такая картина распределения амплитуд колебаний называется интерференционной, а явление сложения колебаний от двух или нескольких источников — **интерференцией**.

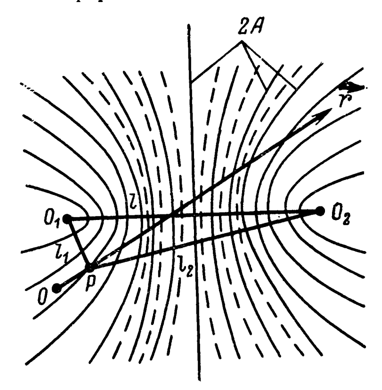


Рис. 1. Интерференция волн от двух точечных источников.

Явление интерференции имеет место для всех видов волн, так что интерференционную картину можно получить от любых двух источников колебаний, но наиболее четко выраженные усиления и ослабления результирующих колебаний наблюдаются в том случае, когда источники обладают своего рода определенной «синхронностью» излучения, называемой когерентностью. Когерентными считаются колебания одной частоты, фазы которых не изменяются друг относительно друга в течение рассматриваемого отрезка времени. Основными источниками когерентного излучения являются лазеры, хотя надо сказать, что даже они не всегда обладают необходимой степенью когерентности, чтобы получить высококачественную голограмму.

Процесс получения интерференционной картины в оптике непосредственно связан с понятием голограммы, ибо голограмма является интерференционной картиной, которая зафиксирована в среде, чувствительной к свету.

Какую же информацию можно извлечь из интерференционной картины? Рассмотрим два источника колебаний (рис. 1), причем будем считать, что это источники светового излучения. Интерференционная картина, которую создают в трехмерном пространстве эти два источника (O_1, O_2), представляет собой ряд гиперболоидов вращения, имеющих общий фокус. Рассматривая распределение максимумов и минимумов на прямой, соединяющей источники, можно определить длину волны излучения, так как расстояние между максимумами (или минимумами) равно половие длины волны $\lambda/2$.

Если рассматривать распределение энергии в другом направлении (например, в направлении вектора **r** из точки O), то увидим, что расстояние между максимумами меняется по определенному закону. По этому закону, зная направление движения, можно определить расположение источников. Соотношение фаз, приходящих в некоторую точку колебаний, можно найти, если известны расстояния от этой точки до источников колебаний. Для точки P (рис. 1) соотношения фаз определяют расстояния l_1 и l_2.

Можно сказать, что в интерференционной картине содержится определенная фазовая информация, позволяющая определить расстояние от какого-то места интерференционной картины до источника (или источников) излучения. Величина максимумов распределения поля в интерференционной картине позволяет оценить интенсивность излучения, а соотношение между максимумами и минимумами — когерентность.

Как видим, в интерференционной картине записана вся возможная информация об излучении источников. Это и явилось тем фактором, который позволил голограммы, т. е. зафиксированные интерференционные картины, применить во многих устройствах и приборах.

Рассмотрим, каким путем можно извлечь всю эту информацию из интерференционной картины — голограммы. Можно произвести микроанализ интерференционной картины с помощью различных методов, путем замеров определить распределение интенсивности и извлечь всю ту информацию, о которой говорилось. Подобные методы используются, когда голография применяется в интерферометрии, при исследовании с помощью голограмм вибраций и малых перемещений.

Однако в большинстве случаев для извлечения информации из голограммы используется явление дифракции света, т. е. свойство светового пучка огибать препятствие, размеры которого соизмеримы с длиной волны светового излучения. Огибая такое препятствие, луч света меняет свое направление и рассеивается. Если на пути пучка светового излучения с длиной волны λ и интенсивностью J поставить множество малых препятствий в виде тонких стержней, полос или непрозрачных штрихов на прозрачной пластине, толщина которых и расстояние между которыми соизмеримы с λ, то этот пучок света после прохождения препятствий разложится на три пучка J_0, J'_1, J''_1 (рис. 2). При этом пучок J_0 пройдет через такую систему полос (дифракционную решетку) без изменения направления, а пучки J'_1 и J''_1 отклонятся на угол α, величина которого зависит от длины волны и шага решетки a. Пучок J_0 называется пучком (или лучом)

нулевого дифракционного порядка, пучки J'_1 и J''_1 называются пучками первого дифракционного порядка и содержат всю информацию о дифракционной решетке. В частности, по углу α, зная длину волны, можно определить шаг решетки, так как

$$a = \frac{\lambda}{\sin\alpha},$$

а по отношению J/J_0 можно определить прозрачность решетки.

Предположим теперь, что источники излучения, представленные на рис. 1, находятся на столь большом расстоянии друг от друга,

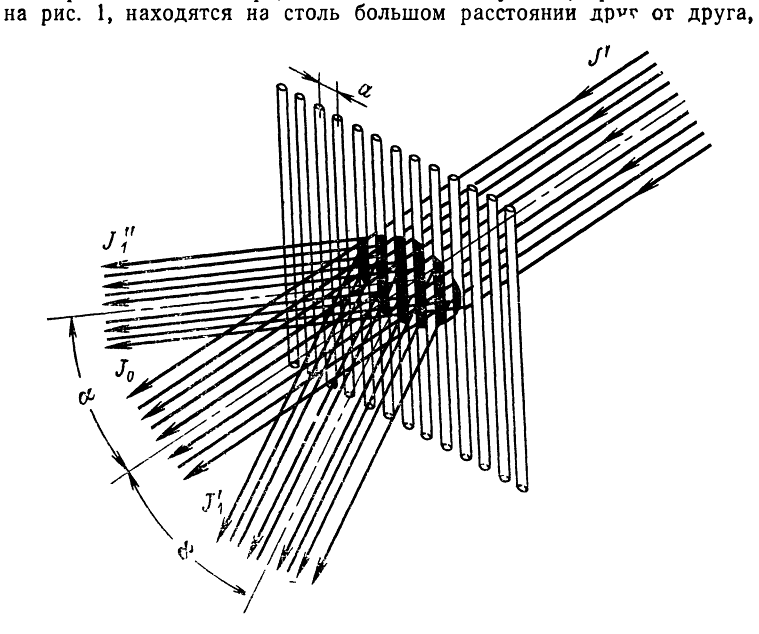


Рис. 2. Разложение пучка света при прохождении через дифракционную решетку.

что при рассмотрении одного из них лучи света от другого можно считать параллельными и фронт волны — плоским. В этом случае образуется интерференционная картина, где интерференционные поверхности имеют вид параболоидов вращения. Поместив позади источника фотопластинку и сфотографировав на нее интерференционную картину, мы после обработки фотопластинки получим негатив, представляющий собой систему концентрических окружностей (рис. 3). Рассматривая этот негатив, можно заметить, что при движении от центра расстояние между окружностями уменьшается. Такая система окружностей называется зонной решеткой Френеля (иногда ее называют также зонной пластинкой Френеля).

Рассмотрим, что получится, если на пластинку Френеля направить плоскую волну света, т. е. волну света от источника, находящегося в бесконечности. Каждый малый участок пластинки можно

рассматривать как элементарную дифракционную решетку. Чем дальше находится этот участок от центра пластинки, тем на большие углы $\pm\alpha$ отклоняет он падающий на него пучок света, так как при удалении от центра шаг решетки уменьшается. В результате образуются две сферические волны света (рис. 4), одна из которых имеет выпуклый сферический фронт, другая — вогнутый. Центр выпуклой волны находится позади пластинки в точке M, а вогнутая

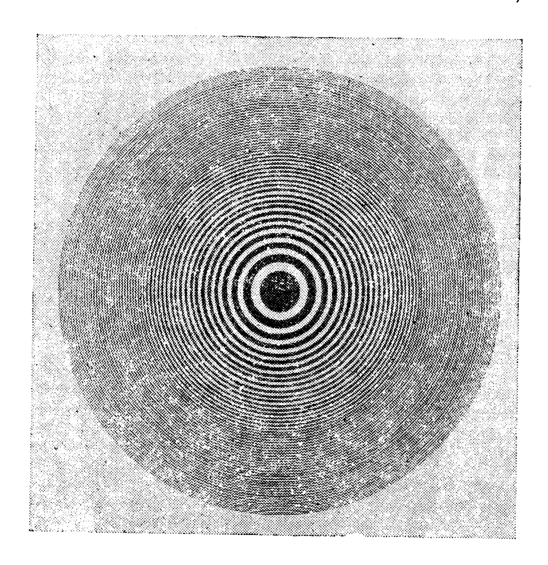


Рис. 3. Зонная пластинка Френеля.

волна сходится в точке D, превращаясь затем в выпуклую волну. Кроме этих двух волн, которые являются пучками первого порядка, существует и пучок нулевого порядка, проходящий через пластинку без изменений.

Наблюдатель, помещенный в точку H, увидит сразу все три волны. Волна, исходящая из точки M, наблюдается как источник светового излучения, находящийся за фотопластинкой в том же самом месте (т. е. в точке O_1), где он находился при экспонировании пластинки. Наблюдаемое за пластинкой изображение источника M называется мнимым изображением в отличие от изображения источника в точке D, которое можно наблюдать перед пластинкой и которое называется действительным изображением.

Таким образом, зафиксированная интерференционная картина (в данном случае пластинка Френеля), по существу, есть не что иное, как голограмма точечного источника света.

Если на место точечного источника излучения O_2 (рис. 1) поместить предмет, размеры которого настолько малы, что в первом приближении он может считаться точечным, то, очевидно, структура интеференционных поверхностей не изменится, изменится лишь контрастность интерференционной картины. Действительно, точечный объект рассеивает свет равномерно во всех направлениях, так что

его можно рассматривать как вторичный источник сферической волны. Если рассматривать голограмму точечного объекта под микроскопом, то можно обнаружить, что она состоит из множества параллельных полос. При замене точечного объекта предметом более сложной формы эти полосы претерпевают изменения, которые тем значительнее, чем более сложна форма предмета. В большинстве случаев можно выяснить закономерности, определяющие расположе-

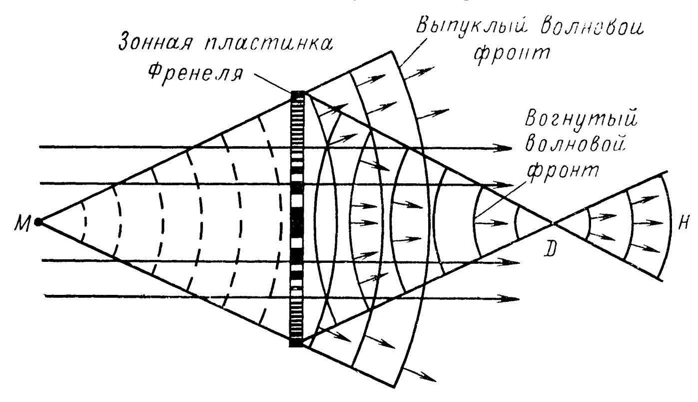


Рис. 4. Прохождение плоской волны через зонную пластинку Френеля.

ние этих полос. А если это так, то набор интерференционных полос, составляющих голограмму, можно получить не только рассмотренным способом, но и другими методами. Например, можно для некоторых объектов получить голограмму расчетным путем, если определить закон распределения интерференционных полос на голограмме, вычертить интерференционные полосы в большом масштабе, а затем переснять их с соответственным уменьшением. Можно также нанести интерференционные полосы на стекло, прочертив их в виде непрозрачных линий механическим путем, или нарисовать голограмму с помощью тонкого луча света непосредственно на фотопластинке. В этих случаях получается искусственная голограмма без объекта, с которой при восстановлении наблюдается изображение несуществующего предмета. Такая искусственная голограмма практически не отличается от голограммы, полученной с помощью интерференции, ничем, кроме способа получения. Поэтому голограммой следует называть зафиксированную совокупность интерференционных полос, хранящих информацию о фронте волны, которая может быть восстановлена (считана) при освещении голограммы световым пучком.

Как получить голограмму объекта и восстановить записанное на ней изображение

Как уже было сказано, чтобы получить голограмму, необходимо зафиксировать интерференционную картину от двух источников излучения, одним из которых является голографируемый объект. Другими словами, для записи голограммы необходимы два когерентных световых пучка. Один из них, который освещает объект и

рассеивается им, называется предметным (или сигнальным) пучком, другой, создающий когерентный фон, — опорным пучком. Для восстановления изображения объекта голограмма освещается только одним опорным пучком.

Предложенный Габором метод получения голограмм объектов заключался в том, что фотопластинка для записи голограммы располагалась на одной прямой с источником света и предметом. В этом случае при восстановлении лучи света, образующие действительное

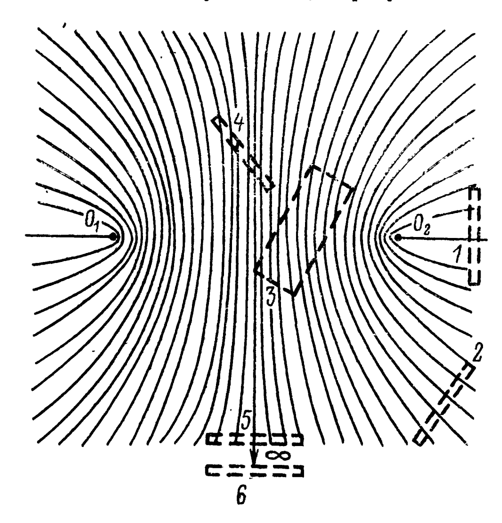


Рис. 5. Регистрация интерференционной картины при различных методах голографирования.

и мнимое изображения, а также пучок нулевого порядка, распространяясь в одном направлении, накладываются по лучу зрения и создают взаимные помехи. Кроме того, в схеме Габора волновой фронт опорного пучка сильно искажается самим предметом, в то время как при восстановлении он остается неискаженным. Поэтому качество изображения ухудшается.

Однако для записи голограммы совсем не обязательно располагать фотопластинку, предмет и источник света на одной прямой. Зарегистрировать интерференционную картину можно, поместив фотопластинку и в другое место. Именно способ размещения фотопластинки относительно источника света и предмета и определяет метод голографирования. В настоящее время этих методов несколько. Для иллюстрации некоторых из них рассмотрим рис. 5, на котором представлена интерференционная картина, создаваемая пучками света от двух точечных источников. Поместив фотопластинку в область *1*, получим голограмму Габора. Лейт и Упатниекс в своих экспериментах располагали фотопластинку так, чтобы лучи света от источников пересекались в области фотопластинки под некоторым углом (область *2*). Это дает возможность при восстановлении раздельно наблюдать действительное и мнимое изображения. Для получения

объемной голограммы Денисюка (область 3), по толщине которой должно поместиться несколько интерференционных полос, фотопластинку следует расположить между источниками света на прямой, соединяющей их, где интерференционные полосы расположены наиболее часто. Поместив фотопластинку в область 4, получим так называемую плоскую голограмму с «обращенным опорным пучком». Безлинзовая Фурье-голограмма записывается на фотопластинке, расположенной симметрично по отношению к обоим источникам и

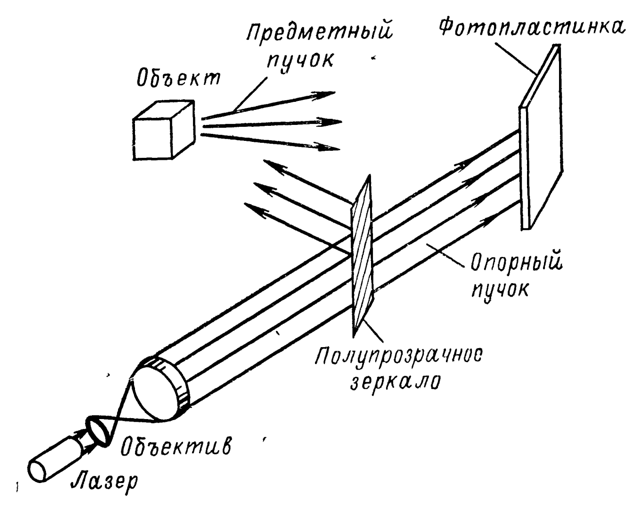


Рис. 6. Получение голограммы по методу Лейта и Упатниекса.

параллельно соединяющей их линии (область 5) Если фотопластинка бесконечно удалена от источников (область 6), получим голограмму Фраунгофера. Практически фотопластинка не удаляется в бесконечность, это условие выполняется с помощью различных оптических схем.

Рассмотрим более подробно процесс голографирования по методу Лейта и Упатниекса. На рис. 6 приведена схема установки с входящими в нее элементами. Источником света здесь служит лазер, тонкий луч света которого преобразуется с помощью системы линз (объектива) в широкий пучок света с плоским волновым фронтом. Этот пучок света разделяется полупрозрачным зеркалом на два. Проходящий через зеркало пучок служит опорным пучком, а второй, отраженный от зеркала пучок освещает объект, представляющий в данном случае объемную фигуру. Объект отражает направленный на него свет во все стороны Между опорным и предметным пучками происходит интерференция в некотором объеме, расположенном за полупрозрачным зеркалом. Чтобы зарегистрировать эту интерференционную картину, фотопластинка располагается таким образом, чтобы опорный и предметный пучки падали на нее, образуя между собой некоторый угол (порядка нескольких десятков градусов). Обычно опорный пучок имеет интенсивность на порядок больше, чем

предметный, и при восстановлении получается наиболее высококачественное изображение объекта.

После экспонирования фотопластинка проявляется, фиксируется и в некоторых случаях отбеливается. При отбеливании на фотопластинке исчезают изображения интерференционных полос и вся пластинка приобретает сравнительно высокую прозрачность. Однако

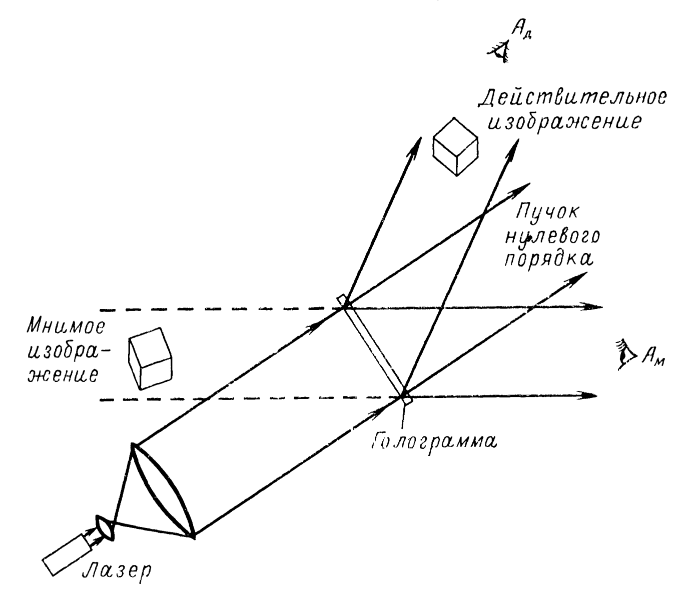


Рис. 7. Схема восстановления изображения с голограммы Лейта и Упатниекса.

информация, записанная на фотопластинке, не исчезает. Здесь вместо темных и светлых полос образуется рельеф на поверхности фотослоя, который и содержит информацию об объекте. Такая отбеленная голограмма называется фазовой и имеет несколько большую эффективность, чем обычная, амплитудная. Чаще всего эффективность голограммы определяется отношением светового потока, падающего на голограмму при восстановлении, к потоку, образующему изображение.

Изготовленную таким образом голограмму можно восстановить, т. е. просмотреть записанное на ней изображение. Для этого обычно пользуются той же установкой, которая служила для голографирования. Голограмма устанавливается на то же место, где находилась фотопластинка при изготовлении голограммы. Поскольку необходимость в двух пучках при восстановлении отсутствует, убирается расщепитель пучка — полупрозрачное зеркало.

На рис. 7 показана схема восстановления в плане. Пучок света от лазера, освещающий голограмму, после прохождения голограммы разделяется на три пучка. Основная часть энергии падающего пучка (~80%) сосредоточена в пучке нулевого порядка. Оставшаяся

энергия света распределяется поровну между пучками первого порядка, образующими действительное и мнимое изображения

При рассматривании мнимого изображения наблюдатель должен находиться в точке $A_м$, откуда можно видеть изображение объекта точно таким же, как и при наблюдении реального объекта из этой точки. Если наблюдатель переместится в точку $A_д$, он увидит

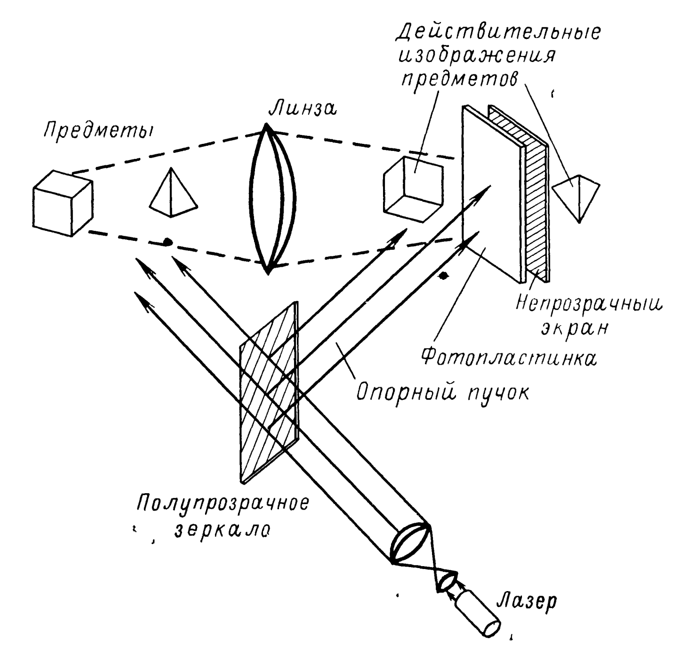


Рис. 8 Получение голограммы сфокусированных изображений предметов.

действительное изображение как бы висящим перед голограммой. Это изображение будет псевдоскопичным, т. е. впадины будут наблюдаться как выпуклости, а выпуклости — как впадины.

Большой интерес представляет метод получения голограмм сфокусированных изображений предметов, предложенный в 1966 г. американским ученым Л. Розеном. Схема получения таких голограмм показана на рис. 8. Собирательная линза дает действительные (правда, перевернутые) изображения предметов, которые с помощью когерентного подсвета записываются на фотопластинку в виде голограммы. Фотопластинку во время записи можно поместить даже между изображениями, так что при восстановлении изображения по записанной таким образом голограмме будет виден один предмет за голограммой, а другой — перед ней.

Интересно рассмотреть, что будет, если между действительными изображениями двух предметов поместить непрозрачный экран, как это показано на рис. 8. Этот экран должен препятствовать образованию изображения пирамиды. Наблюдатель, который ранее, когда не

было фотопластинки и экрана, мог видеть оба предмета, теперь не увидит ничего. Однако непрозрачный экран совершенно не повлияет на процесс получения голограммы, так как на голограмму всегда записывается волновая картина, которая существует в плоскости фотопластинки и благодаря своим свойствам способна дать на фотопластинке такое же изображение пирамиды, как если бы непрозрачного экрана вовсе не было. Рассматривая такую голограмму в восстановленных лучах, мы увидим оба предмета.

Все изложенное справедливо только для голограмм, у которых расстояние между соседними интерференционными полосами соизмеримо с толщиной слоя фотоэмульсии (так называемые плоские голограммы). В случае применения фотопластинок, у которых толщина слоя фотоэмульсии во много раз превышает расстояние между интерференционными полосами, получаются так. называемые толстослойные, или объемные, голограммы. В некоторых случаях от этих голограмм можно получить только один пучок, формирующий мнимое изображение. Как было сказано, в процессе получения таких голограмм фотопластинку целесообразно располагать между источником света и предметом, так что предметная и опорная волны распространяются навстречу друг другу и интерферируют в толще фотоэмульсии.

Особенности голограммы и восстановленного изображения

В отличие от фотографического изображения при рассмотрении голограммы трудно определить, что на ней зафиксировано: изображение здесь зашифровано в виде интерференционных полос, которые нельзя различить невооруженным глазом. При сильном увеличении можно рассмотреть линии, отстоящие друг от друга на расстояние в несколько микрон, причем чем сложнее объект и сложнее волновой фронт от него, тем труднее выделить отдельные линии.

Основное отличие голограммы от фотографии заключается в том, что в голограмме информация о точке распределена по всей поверхности фотопластинки, в то время как в фотографии точка объекта отображается в точку на плоскости (фотопластинке). Отсюда вытекает ряд других отличий, таких как возможность наблюдения объемного изображения, различие в технике получения голограмм и фотографических изображений. Общим для фотографии и голографии является фотохимический процесс, заключающийся в экспонировании фоточувствительного материала и его обработке химикатами для проявления засвеченных участков. Поэтому иногда процесс голографирования называют фотографированием интерференционной картины.

Голограмма, имеющая вид серой фотопластинки, которую с первого взгляда можно принять за обычный, покрытый вуалью фотонегатив, обладает удивительной способностью восстанавливать объемное изображение. Как же это получается?

Вспомним ранее описанный опыт по голографированию светящейся точки и представим себе, что для восстановления изображения используется не вся голограмма, а только нижняя часть ее. В этом случае при восстановлении изображение точки будет находиться выше голограммы и из точки A_1 наблюдатель увидит мнимое изображение, а из точки A_2 — действительное (рис. 9). Поскольку объект состоит из множества точек, то из точки A_1 наблюдатель увидит за фотопластинкой мнимое объемное изображение объекта, полностью

соответствующее реальному объекту, а из точки A_2 — действительное изображение. Если учесть, что для всех точек объекта справедливо то, что расстояние от точки действительного изображения до голограммы (или плоскости, в которой она находится) равно расстоянию от соответствующей точки мнимого изображения до нее, то наибольшую кривизну будет иметь фронт волны от точки объекта,

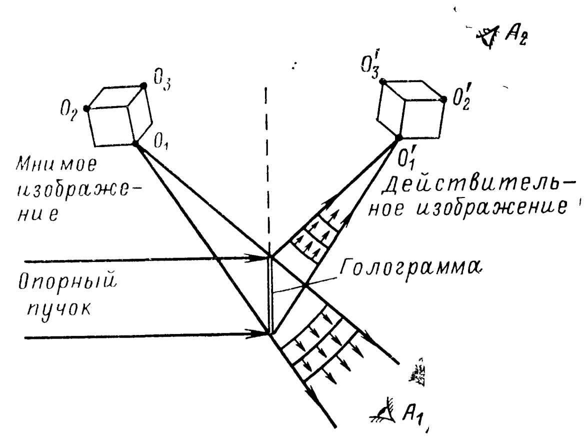


Рис. 9. Формирование действительного и мнимого изображений объекта частью голограммы.

находящейся при голографировании ближе всех точек от фотопластинки. На рис. 9 такой точкой является точка O_1. Поэтому действительное изображение, которое наблюдается перед голограммой, кажется наблюдателю вывернутым, псевдоскопичным (впадины кажутся выпуклостями и наоборот). В связи с этим в голографии при восстановлении большей частью используют мнимое изображение.

Заметим, что для иллюстрации свойств голографического изображения мы воспользовались только частью голограммы. Если эту часть еще уменьшить, мы не заметим каких-либо существенных изменений: изображение объекта восстановится почти таким же, как и от большой голограммы. Мнимое и действительное изображения будут иметь те же размеры и конфигурацию, только угол наблюдения уменьшится. Голограмму можно закрыть в нескольких отдельных местах, но изображение всегда восстановится полностью.

То, что и с части голограммы можно восстановить полное изображение объекта, обусловливает одно из основных свойств голограммы — ее высокую помехозащищенность и помехоустойчивость — и объясняется тем, что информация о каждой точке объекта распределена на всей поверхности голограммы. Это свойство голограмм особенно ценно при использовании их в устройствах, в основе построения которых лежит принцип фиксации (запоминания) микроизображений, так как здесь не сказывается влияние помех в виде пыли, грязи или царапин, которые ограничивают минимальные размеры изображений на обычных фотонегативах.

Однако уменьшать используемую для восстановления изображения часть голограммы бесконечно нельзя, так как одновременно уменьшается объем записанной на ней информации. В первую оче-

редь это сказывается на структуре изображения: оно становится крупнозернистым. Затем по мере затемнения все большего участка голограммы начинают пропадать мелкие детали, затем более крупные и в конце концов от изображения остаются только расплывчатые контуры. Поэтому минимально допустимое сокращение площади голограммы при ее восстановлении определяется требованиями к степени различимости (разрешению) деталей объекта.

Ранее рассмотренные опыты подразумевали использование для голографирования и восстановления одного и того же опорного пучка, так что мнимое изображение объекта имело полную аналогию с самим голографируемым объектом и размеры изображения совпадали с размерами объекта. При изменении формы опорного пучка, применяемого для восстановления, и длины волны света такое соответствие нарушается, однако при этом проявляется другое полезное свойство голограммы — возможность изменения размеров изображения при восстановлении. Расширяющийся пучок дает возможность увеличить размеры изображения подобно тому, как это происходит при проекции диапозитива на экран или при увеличении фотоизображений с помощью фотоувеличителя. Дополнительное увеличение можно получить, если увеличить длину волны света восстанавливающего пучка. Применяя оба эти способа, можно получить увеличение, во много раз большее, чем у современных оптических микроскопов.

Следующая особенность голограммы относится к передаче распределения освещенности объекта. Пропускание света проявленной фотоэмульсией связано с экспозицией (освещенность $\times$ время) определенной зависимостью, т. е. на экспозицию ниже некоторого минимального значения $H_{\text{мин}}$ фотопластинка вообще не реагирует, а при экспозиции выше $H_{\text{макс}}$ коэффициент пропускания остается постоянным. Таким образом, фотопластинка реагирует на распределение яркостей объекта лишь в относительно узком интервале от $H_{\text{мин}}$ до $H_{\text{макс}}$ и поэтому не позволяет воспроизвести весь диапазон яркостей объекта, который много шире диапазона, соответствующего $H_{\text{мин}}$ $H_{\text{макс}}$.

В то же время голограмма, как мы убедились на примере дифракционной пластинки Френеля, обладает фокусирующими свойствами. Это приводит к тому, что при восстановлении в одни точки изображения может быть сфокусировано много больше света, чем в другие, и, следовательно, можно получить в изображении объекта много больший диапазон яркостей, чем это позволяют свойства самого фотоматериала.

Сейчас во многих отраслях науки и техники требуется решать задачи, связанные с выделением сигнала, предмета или образа из совокупности подобных ему, но имеющих некоторые отличия. Способность голограммы выделять образ, записанный на ней, является, пожалуй, самым ценным свойством голографии. Поэтому рассмотрим этот вопрос несколько подробнее.

Существует общий метод решения таких задач, который заключается в том, что сигнал, несущий информацию об объекте, преобразуют, чтобы получить спектр частот исходного сигнала, а затем ведут обработку уже этого спектра. Оптический сигнал, представляющий собой пространственное распределение амплитуд и фаз волны света, идущего от объекта, также может быть разложен на частотные составляющие. Однако в отличие от частот радиодиапазона (временны́х) свет разлагается на пространственные частоты, которые можно наблюдать непосредственно на проявленной фотопластинке.

Выделим из пучка света, отраженного от объекта, два элементарных пучка: один — параллельный вектору **a** и другой — параллельный вектору **b** (рис. 10). Каждый из этих пучков образует свою синусоидальную дифракционную решетку: пучок в направлении вектора **a** — решетку с периодом T_a, пучок, параллельный вектору **b**, — решетку с периодом T_b. Представим себе, что фотопластинка зафиксировала только пучок, параллельный вектору **a**. Тогда под микроскопом мы сможем наблюдать на проявленной фотопластинке распределение прозрачности, соответствующее пространственной частоте пучка **a** с периодом T_a. При рассмотрении зафиксированной пространственной частоты, соответствующей пучку **b**, будет наблюдаться синусоидальная решетка с периодом T_b. Из луча, отраженного от объекта, можно выделить бесчисленное множество параллельных пучков света, и каждому пучку будет соответствовать своя синусоидальная дифракционная решетка строго определенной пространственной частоты. При экспонировании фотопластинка зарегистрирует решетки различных пространственных частот, наложенные друг на друга. Например, при наложении двух пучков получается распределение интенсивности в виде синусоиды, амплитуда которой меняется с частотой, равной разности пространственных частот исходных пучков. При большем числе пучков картина получается еще более сложной.

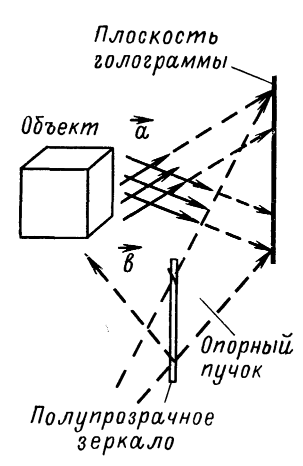


Рис. 10. Разложение света, идущего от объекта, на пространственные частоты.

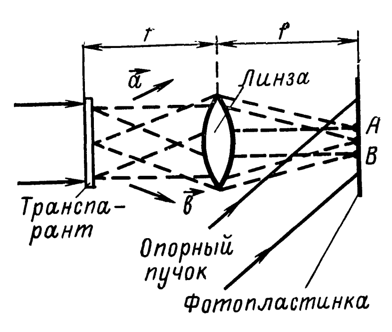


Рис. 11. Схема разложения пучка света на пространственные частоты.

Схема разложения пучка света на пространственные частоты представлена на рис. 11. Отличие ее от ранее рассмотренных схем заключается в том, что между объектом, в качестве которого взят плоский транспарант, и фотопластинкой помещена выпуклая линза таким образом, чтобы транспарант и фотопластинка находились в фокусах этой линзы. В этом случае лучи, идущие параллельно вектору **a**, собираются в точке *A*, а лучи, соответствующие направлению **b**, — в точке *B*. Следовательно, линза позволяет разложить пучок света на составляющие его пространственные частоты, а фотопластинка зарегистрирует эти частоты в виде точек, т. е. каждая

пространственная частота получит свое отображение на фотопластинке в виде точки. Если при этом на фотопластинку падает и опорный пучок, то на ней будет зарегистрирована образовавшаяся интерференционная картина. Полученная таким образом голограмма называется голограммой Фурье. Заметим, что линза здесь создает условия удаленности фотопластинки от объекта в бесконечность.

Голограмма Фурье является оптимальным пространственным фильтром. Такой фильтр обладает свойством распознавать тот транспарант, с которого фильтр был изготовлен, создавая в плоскости изображения яркие точки — пятна опознавания. Для этого транспарант помещается в фокальной плоскости линзы $Л_1$ слева (рис. 12),

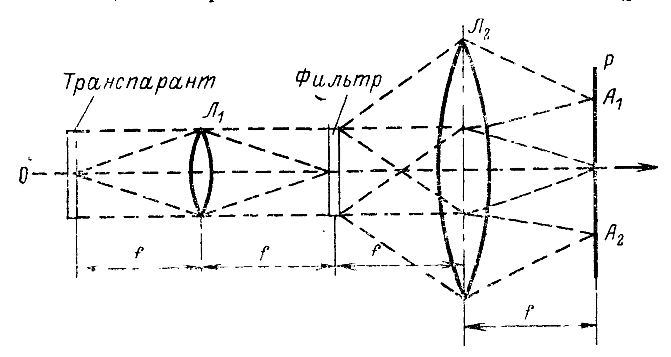


Рис. 12. Схема действия оптимального пространственного фильтра — голограммы Фурье.

а по другую сторону линзы также в фокальной плоскости устанавливается пространственный фильтр. За фильтром на расстоянии, равном фокусному, помещается вторая линза $Л_2$. Если теперь транспарант осветить когерентным светом, то в фокальной плоскости P будет видно практически неискаженное изображение транспаранта, а в точках A_1 и A_2 — яркие пятна опознавания, расположение которых соответствует пучкам первых дифракционных порядков.

Яркость пятен будет максимальной, если для опознавания установлен тот самый транспарант, с которого получен фильтр. При повороте транспаранта яркость пятен уменьшается.

Свойство голограммы Фурье выделять объект, с которого она изготовлена, используется в голографических устройствах распознавания образов и устройствах оптической обработки информации. Этот метод опознавания тем надежнее, чем сложнее объект, который надо распознавать.

Совершенно особыми свойствами обладают объемные голограммы, впервые полученные Ю. Н. Денисюком в толстослойных фотоэмульсиях. Если в зону пересечения световых пучков ввести пластинку, покрытую слоем фотоэмульсии, толщина которого существенно превышает расстояние между соседними интерференционными поверхностями, то система этих поверхностей будет зафиксирована в эмульсии в виде полупрозрачных отражающих слоев металлического серебра, образующих трехмерную дифракционную структуру. Если такую объемную голограмму осветить белым светом, то из его широкого спектра голограмма сама выделит свет только одной дли-

ны волны и определенного направления. Поэтому при восстановлении объемную голограмму не обязательно освещать лазером, а можно пользоваться обычными источниками света, вплоть до карманного фонарика.

Если при записи голограммы фотопластинка экспонировалась в свете нескольких спектральных линий (например, синей, зеленой и красной), то каждая длина волны образует в фотоэмульсии свою дифракционную структуру. При восстановлении изображения соответствующие длины волн будут выделяться из сплошного спектра, что приведет к восстановлению не только фронта, но и спектрального состава световой волны, т. е. к получению цветного изображения.

Материалы и устройства для голографирования

Мы рассмотрели принципы голографии и особенности голограмм, исходя из предположения, что используются идеальные устройства и материалы. В реальных условиях приходится иметь дело с устройствами и материалами, характеристики которых в той или иной степени отклоняются от идеальных. В частности, источники света — лазеры не дают пучок абсолютно когерентного света; фотоматериалы имеют зернистость и часто величина зерна превышает расстояние между интерференционными полосами; для экспонирования требуется определенное время и в процессе экспонирования требуется обеспечить стабильность интерференционной картины в плоскости фотопластинки. Все это сказывается на качестве голограммы и восстановленного с нее изображения.

Прежде всего для получения и восстановления голограмм требуется источник когерентного излучения. В настоящее время наибольшую степень когерентности имеют колебания, генерируемые оптическим квантовым генератором — лазером. Существует несколько типов лазеров, отличающихся друг от друга режимами работы, длиной волны и спектральным составом излучения, мощностью и т. д. Здесь мы рассмотрим лишь те свойства лазерного излучения, которые позволяют получить и восстановить голограмму.

Идеальный когерентный источник излучает свет строго одной частоты. Реальный лазер излучает спектр колебаний — спектральную линию, в составе которой присутствуют несколько частот. Ширина спектральной линии связана с понятием временнóй когерентности и в конечном счете определяет допустимую глубину голографируемой сцены.

Существующие гелий-неоновые лазеры могут генерировать непрерывные колебания, имеющие очень узкие спектральные линии, что позволяет с их помощью голографировать сцены глубиной в несколько десятков метров. Однако малая мощность излучения таких лазеров (0,1—0,5 *мвт*) ограничивает возможности их применения, так как в этом случае для получения голограмм требуется слишком большая экспозиция, измеряемая десятками минут. При увеличении мощности гелий-неоновых лазеров путем увеличения длины газоразрядной трубки увеличивается и ширина спектральной линии, так что при мощности 100 *мвт* гелий-неоновый лазер позволяет голографировать сцены глубиной не более 20 *см*.

Лазер излучает световой луч в виде нескольких пучков, и поэтому другое требование, предъявляемое к лазерам, связано с пространственной когерентностью их излучения, которая определяется по степени интерференции этих отдельных пучков. Пространственная ко-

герентность не влияет на качество голограммы, если лучи из разных пучков не перемешиваются и при записи на голограмме происходит их полное совмещение.

При восстановлении голограммы требования к когерентности источников излучения значительно менее строги, чем при ее получении. Требования к временно́й когерентности излучения определяются тем, что изображения объекта, полученные при дифракции света разных длин волн, не должны быть сдвинуты заметно друг относительно друга. Требования же к пространственной когерентности источников сводятся при восстановлении к тому, чтобы угловые размеры источников были достаточно малы. Этим требованиям удовлетворяют многие лазерные источники света, но неплохие результаты также можно получить при использовании ртутных ламп сверхвысокого давления, а иногда даже обычных ламп накаливания.

Ряд особых требований голография предъявляет к фотоэмульсиям. Высокая разрешающая способность фотоэмульсии необходима, чтобы фиксировать отдельные дифракционные линии, а хорошая контрастность обеспечивает получение достаточного различия между темными и светлыми частями голограммы. Поскольку такие требования достаточно противоречивы, в каждом отдельном случае приходится идти на некоторый компромисс, определяемый конкретными частными требованиями к качеству голограммы. Обычно пригодность для голограмм того или иного фотоматериала можно определить по его частотно-контрастной характеристике, т. е. функции пространственной частоты, описывающей преобразование контраста объекта в контраст фотографического изображения. Как правило, фотоматериал считается пригодным для голографирования, если наиболее частые интерференционные полосы в плоскости фотопластинки не вызывают падения частотно-контрастной характеристики ниже 5—10%.

Важное значение имеет чувствительность фотоэмульсии, поскольку она определяет необходимую для записи голограммы экспозицию. Чувствительность фотослоя к различным длинам волн неодинакова, кроме того, при изменении длины волны меняется разрешающая способность фотоматериала, которая обычно падает при смещении длины волны излучения в сторону синего света.

Все эти факторы заставляют особенно тщательно подходить к выбору типа фотоматериала для записи голограмм. В настоящее время наиболее часто применяемыми в голографии материалами являются отечественные фотоэмульсии — ВР, Микрат-900 и зарубежные — Кодак 649-F, разрешающая способность которых лежит в пределах от 2 000 до 5 000 *линий/мм*. Однако чувствительность указанных материалов весьма низкая, всего 50—300 *эрг/см²*, что примерно соответствует сотым долям единицы по шкале ГОСТ. Это объясняется тем, что чувствительность фотослоя связана с размерами зерен галоидного серебра и чем выше чувствительность, тем более зернистым оказывается фотоматериал и, следовательно, тем ниже его разрешающая способность.

В голографии находят применение и различные фотохромные материалы, т. е. материалы, изменяющие свой цвет под действием света, щелочно-галоидные кристаллы, прозрачность которых меняется под действием излучения, различные термопластики и фототермопластики и т. п. Многие из этих материалов имеют очень высокую разрешающую способность, во много раз превышающую разрешающую способность фотоэмульсий.

Не следует, однако, думать, что класс пригодных для голографии фотоматериалов ограничен только материалами с высокой разрешающей способностью. Достаточно высококачественные голограммы можно получить и на фотоматериалах с малой разрешающей способностью. Для этого необходимо, чтобы при записи интерференционные полосы далеко отстояли друг от друга, что в свою очередь требует увеличения размеров голограммы. Чем ниже разрешающая способность фотоэмульсии, тем большая площадь фотопластинки требуется для высококачественной регистрации голограммы.

Голограмму можно записать также в виде картины распределения зарядов на электрооптическом кристалле. Кристалл покрывается поляризационно-оптическим материалом, изображение на котором можно быстро проявить и стереть посредством нагревания. В этом отношении перспективны также некоторые магнитные пленки (например, MnBi), на которых можно достаточно быстро записать голограмму и также быстро стереть ее намагничиванием.

Основные элементы установки для получения голограммы — это объект, источник когерентного света, фотопластинка и различные вспомогательные оптические элементы.

Обычно схема для получения голограмм имеет две ветви — два оптических пути. По одному идет свет для освещения объекта, по другому — опорный пучок. На этих ветвях расположены различные оптические элементы: расширители луча лазера (лазерный луч имеет ширину не более нескольких миллиметров), элементы для изменения направления пучков, расщепители пучков — элементы для разделения луча лазера на две части. В некоторых случаях освещающий пучок делится еще на несколько частей для того, чтобы осветить предмет с нескольких сторон.

Для расширения луча лазера используются линзы или системы линз. Часто применяется диафрагма для ограничения размеров пучка и устранения влияния несовершенства оптической системы. Изменение направления пучка осуществляется при помощи зеркал и призм; для деления пучков применяются полупрозрачные зеркала, оптические клинья и дифракционные решетки. В некоторых случаях для разделения пучков применяются элементы волоконной оптики.

Обычно оптические системы для голографирования включают в себя около десятка оптических элементов. Для того чтобы во время экспозиции не происходило смещение интерференционной картины, эти элементы жестко крепятся на едином основании — оптической скамье. На рис. 13 представлена установка для получения голограмм. Очень часто при длительном экспонировании бывает недостаточно только закрепить элементы на едином основании. За счет вибраций и нестабильности температуры также может происходить смещение интерференционной картины в плоскости голограммы. Ввиду этого установки размещают на массивной бетонной или стальной плите, которая в свою очередь размещается на амортизационной пневматической подушке — например, на надутых автомобильных камерах, футбольных или теннисных мячах. Вся установка располагается в помещении, где исключены резкие колебания температуры.

Все эти требования практически снимаются, если голограмма записывается с помощью импульсного лазера. Применение лазеров, генерирующих так называемые «гигантские импульсы», длительность которых составляет десятки наносекунд, а мощность — до миллиарда киловатт, позволяет голографировать даже быстродвижущиеся объекты.

Техника восстановления записанного на голограмме изображения требует выполнения несколько менее жестких условий в отношении смещения оптических элементов, так как наблюдаемость восстановленного изображения обеспечивается при обычных условиях, в которых производится большинство оптических экспериментов.

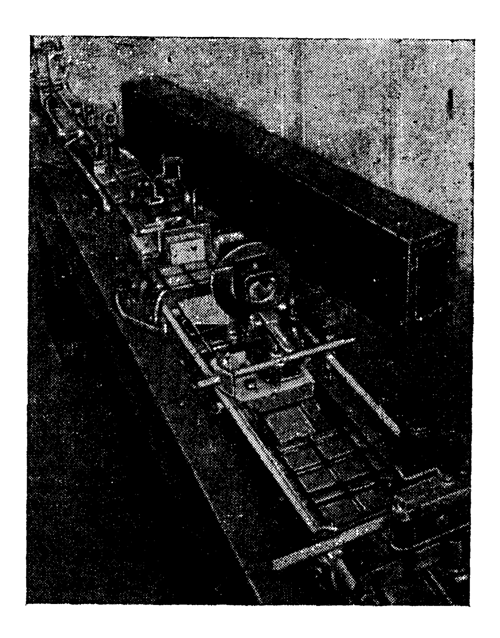


Рис. 13. Установка для получения голограмм.

В настоящее время техника голографирования не представляет особых трудностей. Однако вследствие высоких требований к процессу получения голограмм пока не удается осуществлять оперативную запись и перезапись голограмм в процессе функционирования реальных устройств. Поэтому в настоящее время голограммы используются в устройствах как готовые, технологически законченные элементы.

ПРИМЕНЕНИЕ ГОЛОГРАФИИ В ФОТО- И КИНОТЕХНИКЕ, В ТЕЛЕВИДЕНИИ

При знакомстве с голографией в первую очередь обращает на себя внимание эффект реальности восстановленного изображения. Этот эффект является настолько впечатляющим, что сразу же возникает мысль о целесообразности замены неподвижных фотоизображений голограммами. Очевидно, еще большего эффекта можно ожидать, если получить движущиеся объемные изображения — голографическое кино. И, наконец, появляется реальная возможность пере-

дачи на большие расстояния объемных движущихся изображений, т. е. создания объемного телевидения.

Сегодняшняя техника, однако, делает в этом направлении лишь самые первые шаги.

Объемная фотография

Возможностью рассматривать предмет под разными ракурсами при отсутствии самого предмета не исчерпываются особенности фотографической голографии. В отличие от обычной фотографии голограмма регистрирует весь предмет одинаково четко по всей глубине, чего нельзя добиться никакими фотографическими ухищрениями. Следовательно, нет опасности при голографировании получить нерезкое изображение из-за недостаточной фокусировки. На рис. 14 представлены два фотоснимка одного и того же изображения, восстановленного с голограммы. В первом случае (рис. 14,*а*) наводка объектива на резкость осуществлялась по переднему плану (статуе), во втором случае (рис. 14,*б*) — по заднему плану. Как видно из фотографий, в обоих случаях восстановленное изображение имеет одинаковую четкость.





а) *б)*

Рис. 14. Фотографии изображения, восстановленного с голограммы. Фотоаппарат сфокусирован на передний (*а*) и задний (*б*) план.

При наблюдении голографического изображения происходит аккомодация глаза на различные участки сцены, так же как при рассмотрении реальных объектов. Изображения сцены или предмета можно рассматривать и через оптический прибор (например, лупу), причем эффект будет таким же, как и в случае наблюдения реального предмета. Для иллюстрации свойств голограммы часто голографируют сцену вместе с линзой, что позволяет, меняя точку наблюдения, рассматривать через изображение линзы различные части сцены.

Еще больший эффект получается, если наблюдать изображение, восстановленное с круговой голограммы. Для получения круговой голограммы изготовляют прозрачный цилиндр, покрытый светочувствительным материалом, или свертывают фотопленку в трубку. Внутри такого цилиндра размещается голографируемый объект (рис. 15,*а*). Расходящийся луч лазера через линзу освещает объект и пленку (цилиндр). После обработки голограмму освещают таким же расходящимся пучком, в результате чего восстанавливается изображение предмета, которое можно наблюдать со всех сторон, обходя голограмму в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра. Кру-

говая голограмма может быть получена и таким путем, как показано на рис. 15,*б*. В этом случае для создания опорного пучка необходимо выпуклое коническое или сферическое зеркало.

Поскольку в круговых голограммах наиболее наглядно проявляются достоинства объемного голографического изображения, можно ожидать, что установки подобного типа в дальнейшем найдут широкое применение для визуального исследования объектов, время существования которых ограничено. Представим себе, что перед нами стоит задача: подсчитать количество частиц в объеме, когда эти частицы хаотически перемещаются. Такая задача очень актуальна

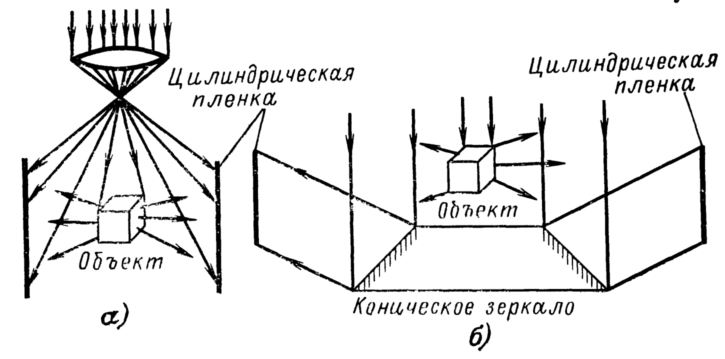


Рис. 15. Схема получения круговой голограммы.

а — опорный пучок создается непосредственно лазером; *б* — опорный пучок формируется коническим зеркалом.

при изучении роста и распада капель тумана, контроле загрязнения воздуха, изучении динамики аэрозолей, анализе смазочных составов, исследовании следов частиц в трековой камере и т. п. Обычная фотография не позволяет зарегистрировать все частицы в объеме с одинаковой резкостью, а на голограмме все частицы регистрируются резко. Как бы «замороженное» на голограмме трехмерное распределение частиц можно рассматривать неограниченно долгое время, необходимое для подсчета частиц.

Голографический прибор для исследования распределения частиц в объеме — дисдрометр позволил легко справиться с задачей подсчета частиц. Этот прибор явился первым практическим применением голографии в технике эксперимента. Основой дисдрометра фирмы Technical Operation является рубиновый лазер мощностью 10 *Мвт* в импульсе. Этот лазер в течение 20 *нсек* освещает объем до 5 000 *см*³.

Импульсные лазеры значительно расширили применение голографии в области фототехники. При малой экспозиции (существующие рубиновые лазеры дают импульсы длительностью порядка 10^{-8}—10^{-9} *сек*) можно получать голограммы объектов, движущихся со скоростью до 1 000 *м/сек*. Предельная скорость движения объекта определяется стабильностью интерференционной картины при экспозиции и зависит от схемы голографирования. Методами импульсной голографии получают изображения различных быстро движущихся объектов вплоть до летящей пули. Кроме того, импульсное голографирование позволяет получать объемные портреты людей.

Голографическое кино

Решение проблемы демонстрации движущихся голографических изображений для достаточно широкой аудитории пока еще сталкивается с рядом серьезных трудностей. В первую очередь это связано с невозможностью увеличить изображение, восстановленное с голограммы небольших размеров, без уменьшения угла обзора. В то же время крупноформатные голограммы размером с экран, сменяющие друг друга с частотой смены кинокадров, пока еще не представляется возможным изготовить. Тем не менее, исследование

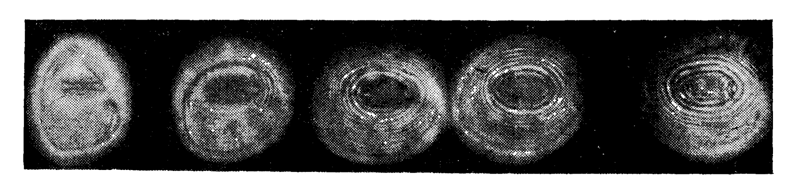


Рис. 16. Пятикадровый голографический кинофильм плазмы лазерной искры.

путей создания объемного кино ведется в ряде стран, в том числе и в Советском Союзе. Перспективы голографического кино весьма заманчивы. Если изображение, наблюдаемое при восстановлении голограммы, поражает своей реальностью, то движущееся объемное изображение производит еще большее впечатление.

Кино в настоящее время является не только средством развлечения, оно служит мощным инструментом в различных научных исследованиях. Поэтому достижения в получении малоформатных голографических кинофильмов можно рассматривать как реализацию способа получения исследователем более обширной информации о физических процессах и явлениях и как первые шаги в деле развития массового голографического кино.

В свете изложенного показательна голографическая установка для скоростного киноголографирования плазмы, разработанная в Физико-техническом институте АН СССР им. А. Ф. Иоффе. Основой установки являются рубиновый лазер и оптическая линия задержки. Один из полученных на такой установке пятикадровых голографических кинофильмов образованной лазерным лучом плазмы показан на рис. 16. Такого типа киноголография может быть также применена для исследования быстропротекающих процессов, например процессов разрушения твердых тел сфокусированным лазерным излучением, электрического взрыва проволочек и т. п.

Иногда можно сделать голографический фильм при помощи техники получения обычных кинофильмов. В этом случае с помощью фокусирующей системы объемную сцену записывают с уменьшением на небольшой голограмме. При восстановлении через ту же систему изображение с такой голограммы имеет натуральные размеры и обладает всеми свойствами голографического изображения. На рис. 17 представлена схема записи такой голограммы. Эта схема реализует рассмотренный выше метод голографирования сфокусированных изображений и позволяет уже в настоящее время создать объемное голографическое кино для небольших сцен. Схема проекции восстановленного изображения, показанная на рис. 18, воспроизво-

дит действительное изображение висящим в воздухе между оптической системой и зрителем.

С помощью описанной системы был получен небольшой (200 кадров) мультипликационный голографический кинофильм. В процессе

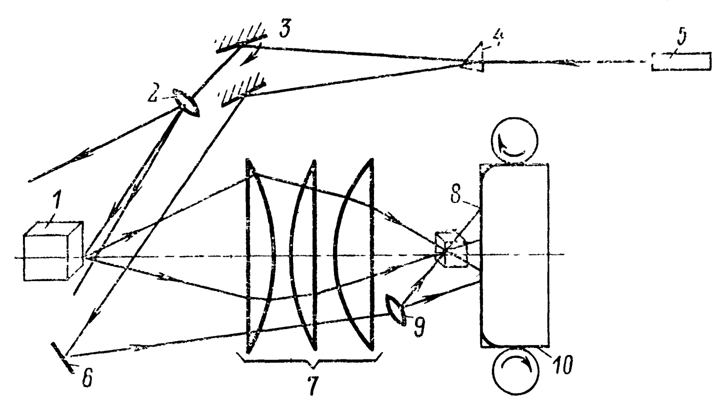


Рис. 17. Схема получения голографического кинофильма с помощью фокусирующей системы.

1 — объект; *2* — линза; *3* — поворотное зеркало; *4* — клин; *5* — лазер; *6* — зеркало; *7* — объектив; *8* — фотопленка; *9* — линза; *10* — лентопротяжный механизм.

изготовления фильма со сцены снимался кадр-голограмма, затем сцена незначительно менялась, производилась съемка следующего кадра и т. д. В результате при восстановлении за счет смены голограмм создавался эффект движения объемных изображений.

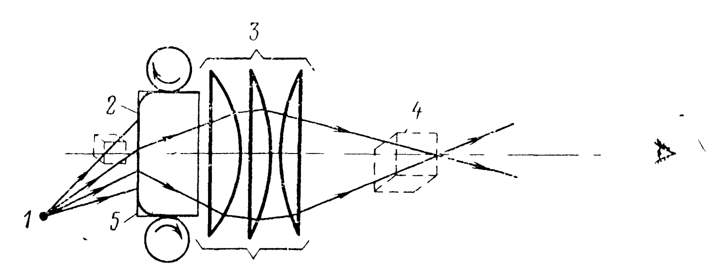


Рис. 18. Схема проекции восстановленного изображения в голографическом кино.

1 — источник некогерентного света; *2* — фотопленка; *3* — объектив; *4* — изображение объекта; *5* — лентопротяжный механизм.

Такой путь получения голографических кинофильмов не единственный. Систему голограмм, отображающих последовательные фазы изменения сцены, можно записать на одной объемной голограмме, изменяя при каждой съемке направление опорного пучка. Если при восстановлении аналогичным образом поворачивать голограмму, то

изображения будут восстанавливаться в той же, что и при съемке, последовательности, создавая эффект движения. Принципиальная возможность осуществления таких систем экспериментально уже подтверждена, однако на одну двумерную голограмму нельзя записать более нескольких десятков кадров. Гораздо бо́льшие возможности представляют в этом смысле трехмерные среды, например кристаллы. К сожалению, в настоящее время размеры кристаллов, пригодных для получения высококачественных голограмм, невелики.

Вопросы создания голографического кино большого формата связаны не только с организацией эффектных зрелищных мероприятий, но и с повышением эффективности подготовки людей тех профессий, где требуется быстрая реакция, умение ориентироваться в сложной обстановке, профессий, где навыки приобретаются в течение длительного периода тренировок, часто связанных с риском. Свести к минимуму риск, но воспитать требуемые навыки у летчиков, водителей транспорта, транспортных диспетчеров — одна из задач, которую позволило бы решить голографическое кино.

Голография в телевидении

Объемное телевидение является проблемой, которая в ближайшее время встанет на повестку дня. Голографическое телевидение помимо очевидных преимуществ, связанных с объемностью изображения, обладает потенциальной помехоустойчивостью и надежностью передачи изображения за счет информационной избыточности, свойственной голограммам, возможностью передавать изображения высококонтрастных объектов и легкостью кодирования.

Принципиальная возможность создания голографического телевидения в настоящее время не вызывает сомнений. Действительно, в интерференционный объем можно вместо фотопластинки поместить передающую телевизионную трубку так, чтобы на ее экране сформировалась интерференционная картина (голограмма). Эта картина может быть затем считана электронным лучом, преобразована в электрические сигналы и с помощью передатчика передана в эфир. Приемник, приняв электрические сигналы, преобразует их в такую же интерференционную картину. С экрана приемника при освещении голограммы лазерным лучом восстанавливается изображение предмета. В сущности, это обычная схема телевидения, отличие которой заключается в присутствии в передающей и приемной частях источников когерентного света — лазеров (рис. 19).

К сожалению, в настоящее время техника телевидения не позволяет реализовать такую систему. Во-первых, разрешающая способность передающих телевизионных трубок с точки зрения голографии очень мала: самые совершенные телевизионные трубки больших размеров имеют разрешение всего лишь несколько десятков линий на миллиметр, в то время как для высококачественной голографии требуется разрешение в несколько сотен линий на миллиметр. Во-вторых, для передачи объемного изображения высокого качества необходима примерно в несколько тысяч раз бо́льшая полоса пропускания телевизионного канала, чем используемая сейчас в телевизионном вещании. В-третьих, устройство формирования голограмм на приемном конце должно иметь разрешающую способность много бо́льшую, чем существующие приемные телевизионные трубки.

Все эти трудности, в основном, обязаны одному фактору — большой информационной емкости голограммы. Например, голограмма

размером 25×25 *см* при разрешении 1 000 *линий/мм* содержит $6 \cdot 10^{10}$ элементов. Если передавать ее по стандартному телевизионному каналу с полосой $8 \cdot 10^6$ *гц*, эта передача займет около двух часов.

Попытки совершенствования приемно-передающей аппаратуры с целью передачи и формирования голограмм в настоящее время не дают положительных результатов: слишком велико различие между тем, что есть, и тем, что требуется. Поэтому идет поиск обходных путей, в первую очередь связанных с сокращением информации

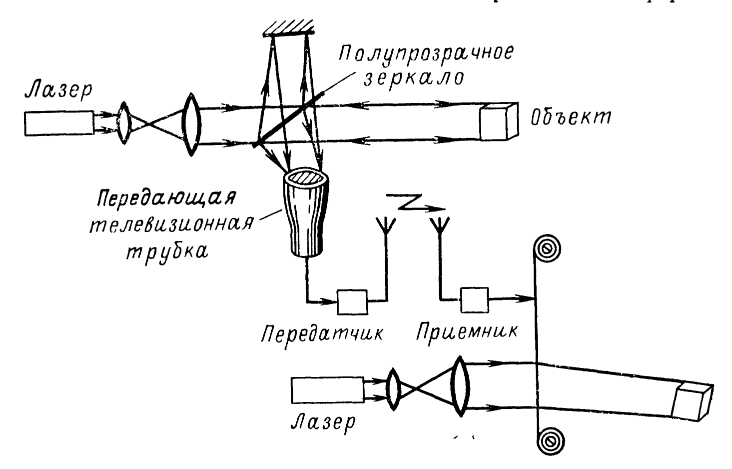


Рис. 19. Схема передачи голограмм по телевидению.

в голограмме. Известны следующие возможности решения этой проблемы: формирование голограмм с большим шагом между интерференционными линиями, т. е. крупноструктурных голограмм; использование при голографировании светорассеивающих сред с целью сокращения полосы пространственных частот; ограничение площади анализируемого участка голограммы.

Однако невозможно сократить информационную емкость голограммы, не жертвуя при этом каким-либо из параметров восстанавливаемого изображения, — четкостью, контрастом, отношением сигнал/шум, углом зрения, объемными свойствами. Например, крупноструктурные голограммы, полученные при малых углах между предметным и опорным пучками (1—2°), имеют такую информационную емкость, которая позволяет передавать их по современному телетракту. Количество линий на миллиметр здесь около 10—15. Такое разрешение достигается современными передающими и приемными трубками. Однако при восстановлении между пучком нулевого порядка и пучками первого порядка получается слишком малый угол, что создает серьезную проблему разделения пучков и лишает восстановленное изображение того эффекта, который наблюдается при обычной голограмме.

Применение рассеивающих сред дает некоторое сокращение информации, хотя ее уменьшение не столь велико, чтобы оставшееся можно было передать по обычному телеканалу и получить на

выходе приемного устройства высококачественное голографическое изображение. Голографическое устройство с рассеивателем отличается от обычного только тем, что луч лазера, перед тем как попасть на голограмму, проходит через рассеивающий экран. Такой же светорассеивающий экран должен присутствовать и при восстановлении. Поэтому ряд технических трудностей, связанных с точностью копирования и установки рассеивающих экранов при восстановлении изображения с голограммы, ограничивает возможности этого метода.

Существенно сокращается объем информации, если анализировать и передавать не всю голограмму, а отдельные участки ее и передавать не все участки, а выборочно. Участок можно выбрать достаточно малым, так чтобы информацию, заключенную в нем, можно было передать по обычному телеканалу. На приемном конце из отдельных участков комплектуется полная голограмма, с которой и восстанавливается изображение.

Учитывая горизонтальное положение глаз человека, можно из передаваемой голограммы исключить сведения о вертикальном параллаксе, т. е. передавать только одну строку из элементарных площадок голограммы. Еще более снижается объем передаваемой информации, если из строки передавать только несколько площадок, а промежутки между ними заполнять на приемном конце многократным повторением этих нескольких площадок. Дальнейшее уменьшение информации в голограмме осуществляется исключением из каждой элементарной площадки информации об объеме. В этом случае передающая часть значительно упрощается и возможности реализации возрастают.

Действительно, устранение в каждой отдельно взятой площадке информации об объеме освобождает от необходимости применения высококогерентных источников света, и, кроме того, сразу же отпадает ряд проблем (высокие требования к виброустойчивости, продольной когерентности, трудности передачи с больших площадок), особенно тормозящих развитие голографического телевидения. Задача сводится к передаче увеличенного числа плоских телевизионных изображений.

Для того чтобы сохранить объемность изображения, плоские изображения снимаются с разных ракурсов. На приемном конце изображения воспроизводятся с помощью системы, которая преобразует телевизионные сигналы в прозрачные трафареты. Затем все трафареты просвечиваются пучком когерентного света, который, пройдя через объективы, формирует совместно с опорным пучком голограмму. Освещая эту голограмму когерентным пучком света, восстанавливают изображение.

В том случае, когда необходимо совместить во времени процессы формирования голограммы и восстановления изображения на приемном конце, плоскости наблюдения и расположения объективов могут быть пространственно разделены полупрозрачным зеркалом. Подобную голограмму принципиально можно получить как угодно большой. Количество передаваемых площадок и полоса пропускания канала определяются назначением проектируемой системы и числом наблюдателей. Применительно к телевизионному вещанию схема передачи изображений является достаточно громоздкой из-за наличия в ней сложных оптических устройств. Для упрощения можно передавать не сфокусированные изображения, а голограммы диапозитивов, полученных для разных ракурсов сцены, а на приемном

конце синтезировать суммарную большую голограмму с помощью оптических затворов.

Интерференционную картину перед передачей по телеканалу можно проанализировать с помощью дифракционной решетки с переменным шагом, затем передать результаты анализа и на приемном конце с помощью аналогичной решетки изготовить голограмму При передаче по такому способу (рис. 20) в интерференционный объем вводится дифракционная решетка с переменным шагом *2*, которая движется вперед-назад и, кроме того, за каждое движение совершает поворот вокруг оси системы на небольшой угол. За решеткой устанавливается фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) *1*, который преобразует прошедшие через решетку световые сигналы в электрические импульсы. Эти импульсы передаются по телеканалу *3* и на приемном конце управляют светодиодом *4*, свет от которого освещает решетку с переменным шагом *2*, аналогичную решетке на передающем конце и движущуюся с ней синхронно. В результате за поворот решетки на 180° за приемной решеткой создается такое же распределение освещенностей, как в плоскости фотоумножителя. Через объектив *5* это распределение проектируется на фотопластинку *6* и получается голограмма объекта, с которой можно восстановить изображение.

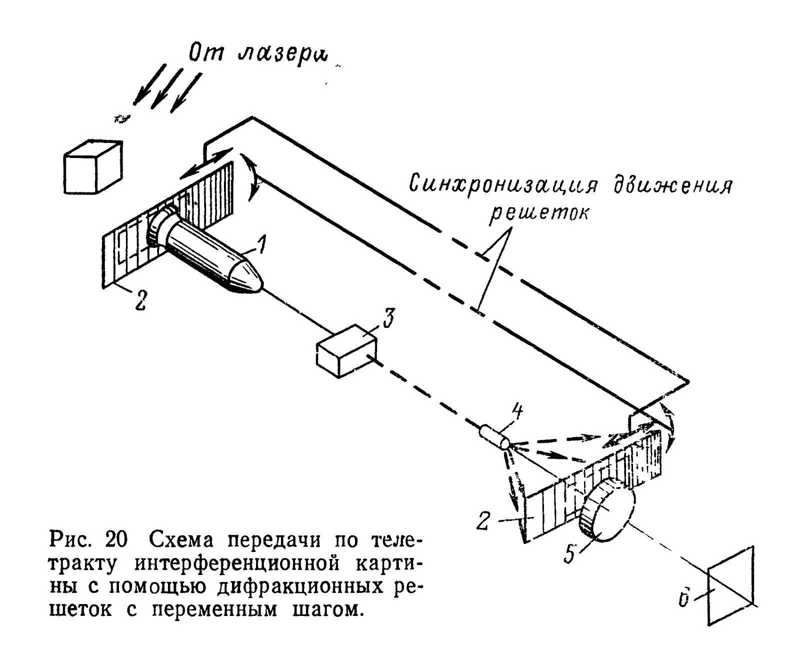


Рис. 20 Схема передачи по телетракту интерференционной картины с помощью дифракционных решеток с переменным шагом.

Все рассмотренные способы голографического телевидения, к сожалению, не обеспечивают требуемой для телевизионного вещания оперативности, т. е. не позволяют реализовать объемное телевидение в общепринятом смысле. Однако эти первые шаги уже позволили решить задачу передачи неподвижных объемных изображений по те-

левизионному и фототелеграфному каналам. Голограммы уникальных объектов, имеющих особо важное значение для научно-познавательных или других целей, можно передавать уже сейчас на значительные расстояния. На рис. 21 представлены результаты опыта по дальней передаче голограммы. Изображения «Пушки» и «Колокола», сфотографированные до (рис. 21,*а*) и после (рис. 21,*б*) передачи голограммы по фототелеграфному каналу Москва — Минск, мало отличаются друг от друга.

В индикаторных устройствах чаще всего содержится значительно меньше информации, чем в телевидении. Следовательно, ограничения, накладываемые в голографическом телевидении большой информа-

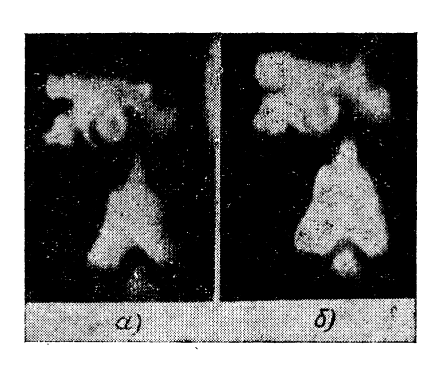


Рис. 21. Голографические изображения «Пушки» и «Колокола» до (*а*) и после (*б*) передачи голограммы по фототелеграфному каналу.

ционной емкостью голограммы, для голографических индикаторных устройств не имеют места. Обычный индикатор воздушной обстановки может, например, индицировать распределение в трехмерном пространстве самолетов в виде ярких точек. Чтобы определить положение точки в трехмерном пространстве, достаточно знать три ее координаты x, y, z. В этом случае скорость работы индикатора определяется количеством индицируемых объектов, а следовательно, можно создать индикатор, работающий в реальном масштабе времени.

Принцип действия голографической индикаторной системы американской фирмы *Bendix* заключается в том, что координаты x, y и z простых объемных изображений накапливаются в цифровой вычислительной машине и записываются затем на голограмме, которую можно быстро проявить и просмотреть. Для этого сигналами x и y из ЦВМ луч света отклоняется в двух взаимно перпендикулярных направлениях и попадает на рассеивающую поверхность *А* (рис. 22). Опорный пучок управляется сигналами z из ЦВМ, которые отклоняют его в плоскости рисунка так, чтоб он попадал в различные точки рассеивающей поверхности *Б*. Таким образом задается глубина точки в пространстве.

В плоскости для записи голограммы образуется интерференционная картина, создаваемая пучком от рассеивающей поверхности *А* (предметный пучок) и пучком от поверхности *Б* (опорный пучок). Эта картина фиксируется на быстропроявляемой пленке, которая передвигается из положения записи в положение индикации по кадрам, как в кинокамере. Смена кадров осуществляется за 1—10 *сек*. За время записи, если позволяет чувствительность материала

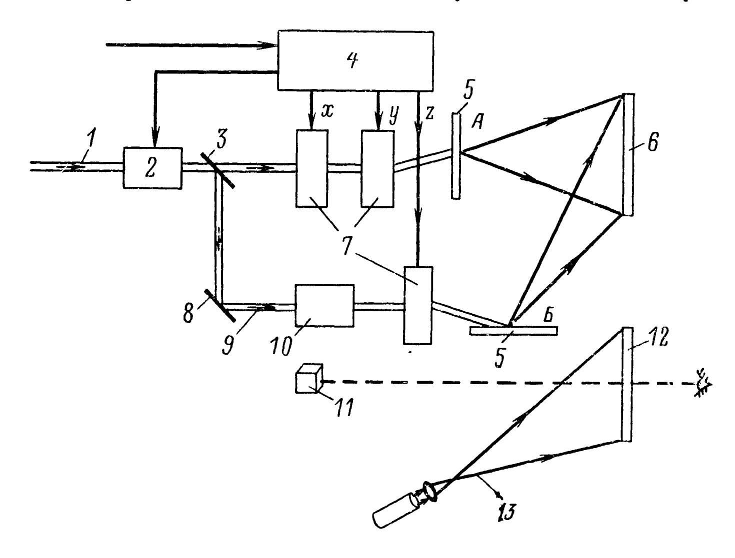


Рис. 22. Схема голографического индикаторного устройства с управлением от ЦВМ.

1 — записывающий лазерный пучок; *2* — модулятор интенсивности лазерного пучка; *3* — расщепитель пучка; *4* — управляющая ЦВМ; *5* — рассеивающие поверхности; *6* — пластинка для записи голограммы; *7* — дефлекторы; *8* — отражатель; *9* — опорный пучок; *10* — компенсатор частоты отклоняющегося сигнала; *11* — мнимое изображение; *12* — рассматриваемая голограмма, *13* — восстанавливающий лазерный пучок.

и мощность лазерного излучения, можно зарегистрировать несколько точек.

Перед тем как попасть в отклоняющее устройство, луч света проходит через модулятор интенсивности лазерного пучка. Этот модулятор прерывает луч света в момент перехода от одной точки к другой и на время перемещения кадра. Модулятор управляется от ЦВМ, которая к тому же регулирует яркость различных точек.

В положении индикации наблюдатель видит мнимые изображения точек, т. е. рассматривает размещение точек в объеме как бы через окно, которым является голограмма. Размеры голограммы можно сделать достаточно большими, если позволяют мощность лазерного луча и отклоняющая система.

В голограммах, полученных с помощью этой индикаторной системы, содержится намного меньше информации, чем в обычных голограммах. Действительно, из ЦВМ приходят только координаты *x*,

y, *z* и сигналы, определяющие яркость точки. Всю информацию о десятке точек можно зашифровать с помощью одной-двух сотен двоичных единиц. Такое количество информации может быть передано по обычному телеканалу за сотые доли секунды. Поэтому с точки зрения передачи данная система является достаточно оперативной. Другое дело, что существующие устройства не позволяют за такое же время создать голограмму. Следовательно, оперативность рассмотренной индикаторной системы определяется только устройствами формирования голограммы.

В обычном же двумерном телевидении голография уже сейчас применяется для улучшения характеристик существующих телевизионных систем. С помощью голографии удалось решить одну из сложных проблем, а именно — проблему синхронизации движения киноленты с частотой телевизионной развертки при передаче кинофильмов по телевидению. Дело в том, что частота смены кадров кинофильма и частота телевизионной развертки отличаются друг от друга, но очень незначительно. Поэтому при передаче кинофильмов применяются довольно сложные устройства для взаимной синхронизации.

Избежать этой неприятности можно, если вместо обычной киноленты использовать голограмму Фурье — изображения, записанного на киноленте. Особенностью голограммы Фурье является полная неподвижность восстановленного изображения при перемещении голограммы в пределах той плоскости, в которой она находится. Поэтому изображение с движущейся ленты можно замедлить или совсем остановить, не вводя мерцания, имитирующего смену кадров. При этом получается более высокое качество изображения, чем можно получить с обычной киноленты, так как на него не влияют такие обычно наблюдаемые дефекты пленки, как пятна, царапины, затемнения части кадра.

Такое устройство в настоящее время создано, причем запись голограмм на ленту производится не фотографическим путем, а методом оттиска с ленты-оригинала. Чтобы изготовить ленту-оригинал, поступают следующим образом. На металлическую (никелевую) ленту наносится фоточувствительный кислотоупорный слой. Затем на этот слой записывается голограмма. После обработки фотоэмульсии производится травление, в результате чего на металлической ленте образуются рельефные интерференционные полосы. Таким образом изготовляется лента-оригинал.

Далее следует относительно простой процесс выдавливания на виниловой ленте того рельефа, который записан на металлической ленте. Для этого виниловая лента прижимается к оригиналу и в нагретом состоянии пропускается между прессующими роликами. Получается копия, которая представляет собой фазовую голограмму. Эта копия во много раз дешевле любой копии на фотопленке или магнитной ленте, причем с одного оригинала можно получить несколько тысяч копий.

В заключение главы о применении голографии в фототехнике, кино и телевидении следует сказать, что рассмотренные методы и устройства являются первыми шагами по пути создания приборов, использующих визуальные эффекты голограммы. Как видно из рассмотренного, тормозом в развитии этого направления является отсутствие технических средств, позволяющих реализовать ряд положительных свойств голограмм, что, без сомнения, в ближайшем будущем будет преодолено.

ГОЛОГРАФИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Прежде чем приступить к рассмотрению возможностей использования голографии в устройствах вычислительной техники, следует сказать, что голографическая обработка информации является частным случаем оптической обработки. Сейчас ни у кого уже не возникает сомнения, что оптические методы обработки информации имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с электронными. Основное достоинство оптических методов состоит в том, что они позволяют вести с очень высокой скоростью одновременную обработку бо́льших массивов информации, а также решают проблему оптимального сочетания высокой скорости обработки и большого объема памяти.

Действительно, если подсчитать, какое количество информации содержится в луче света, прошедшем через пластинку, на которую информация нанесена в виде трафарета, то окажется, что эта величина достигает десятков и сотен тысяч двоичных единиц информации (бит). В то же время большинство современных электронных вычислительных машин способно одновременно оперировать всего с несколькими десятками или, в крайнем случае, сотнями бит информации. Следовательно, применение оптических и, в частности, голографических методов позволяет резко повысить быстродействие вычислительных устройств при обработке большого количества исходных данных. Кроме того, на голограмме можно записывать огромное количество информации об амплитуде и фазе световой волны с высокой плотностью. Если к тому же учесть большую помехоустойчивость голограммы, то становится очевидным, что задача разработки голографических запоминающих устройств сверхбольшой емкости крайне актуальна.

Кроме указанных видов применения голографических методов для создания вычислительных устройств широкое распространение получили методы цифровой голографии, т. е. записи и восстановления голограмм с помощью цифровых вычислительных машин. Полученные таким образом «искусственные» (синтезированные) голограммы являются мощным инструментом при решении ряда задач фильтрации сигналов, распознавания образов, при создании трехмерных индикаторов, а также при моделировании голографических процессов и процессов передачи изображений.

Вычисления с помощью голограмм

В голографических вычислительных устройствах в основном используются ранее известные методы оптических преобразований, которые появились до открытия голографии. Однако с появлением голографии возможности этих методов значительно расширились, что дало основание предсказать создание в ближайшее время устройств обработки информации (процессоров), скорость работы которых во много раз больше скоростей существующих электронных устройств.

Некоторые операции в голографическом процессоре выполняются крайне просто и быстро. Поставим, например, на пути пучка света диапозитив с каким-либо рисунком. Распределение яркости в сечении пучка света, падающего на диапозитив (множитель), определяется двумя координатами — x и y и, следовательно, представляет собой двумерную функцию. Распределение коэффициента пропускания по площади диапозитива (множимое) — также двумерная функция ко-

ординат x и y. Таким образом, и произведение, т. е. распределение яркости в сечении пучка на выходе диапозитива, является двумерной функцией, а двумерной функцией, как известно, можно закодировать много большее количество информации, чем одномерной. Таким образом, в оптике можно осуществить операцию умножения.

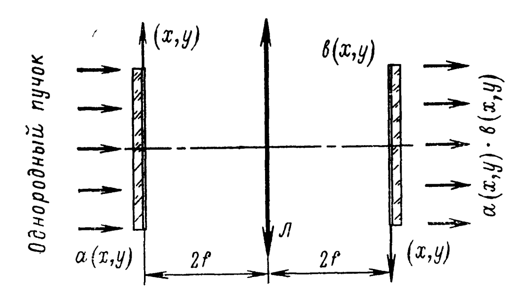


Рис. 23. Схема оптического умножения.

В голограмме, как указывалось раньше, содержится еще и информация о фазе. Поэтому коэффициент пропускания голограммы записывается следующим образом:

$$b = B(x, y)\, e^{j\beta(x, y)},$$

где $\beta(x, y)$ — фаза распределения коэффициента пропускания, зависящая от двух координат.

При помощи подобных функций можно производить операции над комплексными числами, что особенно ценно для решения кибернетических задач распознавания образов.

Если на голограмму, коэффициент пропускания которой описывается выражением $B(x, y)\, e^{j\beta(x, y)}$, падает волна света $a = A(x, y) e^{j\alpha(x, y)}$, то на выходе голограммы получим произведение

$$ab = A(x, y)\, B(x, y)\, e^{j[\alpha(x, y)+\beta(x, y)]}.$$

Это и есть операция умножения комплексных чисел в оптике.

Для практической реализации такой операции в качестве транспарантов берутся голограммы. Затем необходимо поместить два таких транспаранта один за другим так, чтобы первый транспарант (рис. 23), производящий пространственную модуляцию первичного светового пучка, проектировался на второй. Эту функцию выполняет помещенная между транспарантами линза *Л*.

До появления голографии изготовление транспаранта с заданной функцией пропускания $B(x, y)\, e^{j\beta(x, y)}$ было связано с большими техническими трудностями. Необходимо было сначала изготовить транспарант $B(x, y)$ (это обычно не вызывало затруднений), а затем изготовить набор фазовых пластин для имитации функции $\beta(x, y)$. Именно изготовление фазовых пластин представляло наибольшую трудность. Методы голографии позволяют легко изготовить транспарант с любой комплексной функцией пропускания, так как сама голограмма является именно таким транспарантом.

Наиболее часто применяемой операцией в оптических процессорах является преобразование Фурье. Чтобы лучше понять сущность этой операции, представим себе пучок когерентного света, падающий на транспарант (рис. 24), на который нанесена однородная решетка с синусоидальным распределением прозрачности по оси x и шагом,

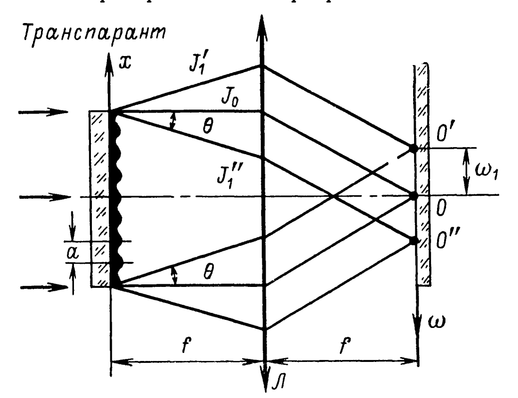


Рис. 24. Схема Фурье-преобразования пространственной структуры предмета.

соизмеримым с длиной волны падающего пучка. На выходе транспаранта согласно законам дифракции образуются три пучка — J_0, J'_1, J''_1. Направление пучка J_0 совпадает с направлением освещающего пучка, а пучки J'_1 и J''_1 идут под углами $+\theta$ и $-\theta$ к направлению пучка J_0. Поставим после транспаранта собирающую линзу $Л$, так чтобы транспарант находился в фокусе этой линзы, т. е. на расстоянии f. Тогда в фокальной плоскости за линзой мы увидим, что весь свет пучка J_0 собирается в точке O, а свет пучков J'_1 и J''_1 — в точках O' и O'' соответственно. Эти точки находятся на расстоянии ω_1 от точки O. Угол θ определяется шагом решетки a и длиной волны света λ как

$$\theta = \arcsin \lambda/a,$$

т. е. чем меньше шаг решетки, тем на больший угол отклоняются пучки J'_1 и J''_1 и тем больше будет расстояние ω_1. Расстояние ω_1 при малых углах θ равно

$$\omega_1 = \lambda f/a.$$

Аналогичная картина наблюдается, если попытаться представить электромагнитные колебания на частотной оси. Например, синусоидальный сигнал (рис. 25,*а*) с параметрами A_0 (постоянная составляющая), A_1 (амплитуда колебаний) и $T = 2\pi/\omega_1$ (период колебаний) может быть изображен на частотной оси так, как это представлено на рис. 25,*б*. Этот переход от представления колебательной функции во временны́х координатах (рис. 25,*а*) к частотным осуществляется математической операцией, называемой преобразованием Фурье.

Сравнивая рис. 24 и 25, можно заметить, что распределение линий на частотной оси и распределение светлых точек (O', O, O'') в фокальной плоскости линзы $Л$ подобны друг другу. И действитель-

но, линза *Л* осуществляет преобразование Фурье, переводя период изменения коэффициента пропускания *a* транспаранта в расстояние ω_1 в задней фокальной плоскости линзы.

Некоторое несоответствие между распределением точек на рис. 24 (три точки) и на рис. 25,*б* (две точки) объясняется тем, что

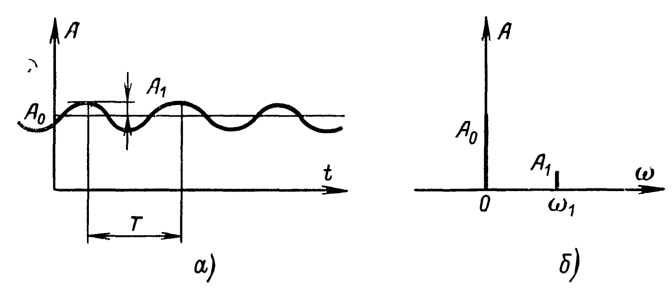


Рис. 25. Форма синусоидального радиосигнала (*а*) и его частотный спектр (*б*).

в случае радиосигнала обычно не изображают отрицательных частот.

Если вместо синусоидального колебания взять сигнал более сложной формы, то в результате преобразования Фурье на частотной оси мы получим спектр частот этого сигнала. На рис. 26,*а* изображен видеоимпульс, спектр частот которого представлен на

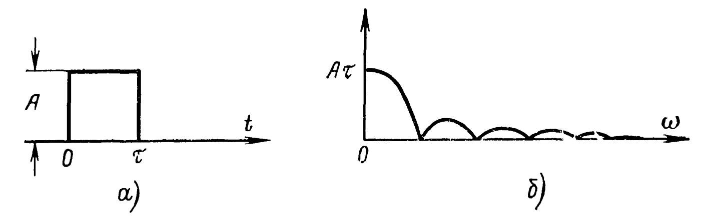


Рис. 26. Форма (*а*) и частотный спектр (*б*) видеоимпульса.

рис. 26,*б*. В оптической системе аналогом видеоимпульса будет оптический сигнал, прошедший щель в непрозрачном экране. Осветив эту щель когерентным пучком света, получим в задней фокальной плоскости цилиндрической линзы *Л* распределение освещенности, соответствующее спектру частот, составляющих изображение щели (рис. 27). В отличие от спектра частот радиосигнала этот спектр называется пространственным спектром частот, или спектром пространственных частот. (Пространственные частоты имеют размерность 1/*см*.)

С пространственным спектром можно производить различные операции фильтрации, подобно тому, как это делается в радиотехнике. В радиотехнических устройствах для выделения известного сигнала из шума используется так называемый комплексно-сопряженный фильтр, коэффициент передачи которого представляет собой

комплексно-сопряженную функцию частотного спектра (Фурье-образа) исходного сигнала. Если через такой фильтр пропустить сигнал, представляющий собой смесь известного (т. е. записанного на

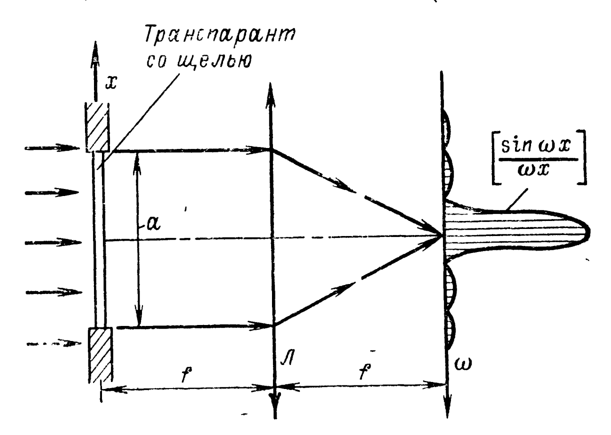


Рис. 27. Фурье-образ оптического сигнала, прошедшего через однородную щель.

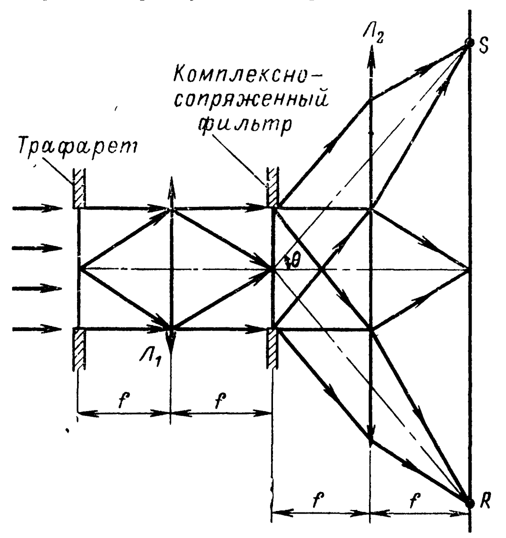


Рис. 28. Схема действия комплексно-сопряженного фильтра.

фильтр) и неизвестных сигналов, то реакция (или отклик) на выходе фильтра на известный сигнал будет намного превышать реакцию на неизвестные сигналы.

Оптический комплексно-сопряженный, или оптимальный пространственный фильтр представляет собой голограмму Фурье. Если

собрать оптическую систему, включающую в себя трафарет, линзу $Л_1$, пространственный фильтр и линзу $Л_2$, как это изображено на рис. 28, и осветить трафарет светом лазера, то в задней фокальной плоскости линзы $Л_2$ (плоскости откликов) будут наблюдаться пятна опознавания (S и R), которые с помощью фотоприемников можно преобразовать в электрические сигналы. Процесс пространственной фильтрации иллюстрируется рис. 29. На рис. 29,*а* представлен трафарет с набором геометрических фигур. Для выбора одной из них, маленького прямоугольника, был изготовлен комплексно-сопряжен-

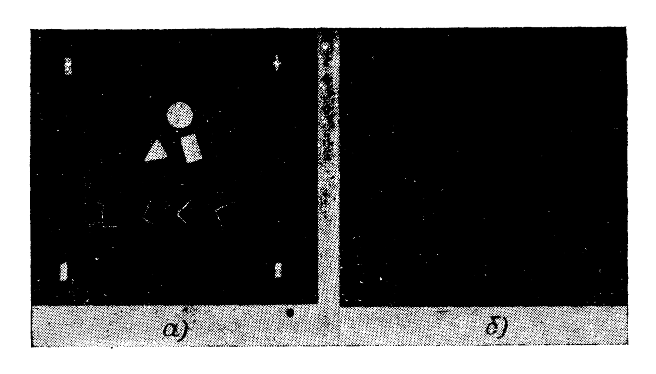


Рис. 29. Трафарет с изображением различных геометрических фигур (*а*) и отклик оптимального пространственного фильтра на изображение маленького прямоугольника (*б*).

ный пространственный фильтр. Результат фильтрации показан на рис. 29,*б*, где видно, что в местах расположения искомых прямоугольников наблюдаются яркие точки.

Устройство, использующее пространственные комплексно-сопряженные фильтры, называется оптическим коррелятором. Такой коррелятор является основным узлом оптической вычислительной машины. Наибольшей эффективностью такой коррелятор обладает при выполнении операции идентификации или распознавания, которую он может выполнить за время на несколько порядков меньшее, чем лучшие электронные вычислительные машины.

Особый интерес представляет собой операция трансляции, выполняемая с помощью голографии. Оптическую трансляцию изображения предмета *А* в изображение предмета *Б* можно осуществить, если изготовить голограмму с предмета *А*, используя в качестве опорного пучка свет, отраженный от предмета *Б*. Освещая затем полученную голограмму светом, отраженным от предмета *А*, получим изображение предмета *Б* и наоборот. Такая схема трансляции имеет тот недостаток, что при освещении голограммы пучком света, отраженным от части предмета (например, *А*), восстанавливается и предмет *Б* и недостающая часть предмета *А*.

Более четкая трансляция осуществляется с помощью пространственного фильтра и специального так называемого компенсирующего негатива. Для этого изготавливается обычный негатив Фурье-образа одного из предметов и голограммы Фурье обоих предметов. На

рис. 30 представлен результат такой трансляции слова OBJECT в слово GHOST. В центре рисунка видны изображения, направляемые на голограмму. Трансляторы могут быть изготовлены как обычными голографическими методами, так и искусственно, т. е. нарисованы, а затем пересняты с уменьшением. На рис. 31 представлены матрица некоторых букв латинского алфавита (слева) и результат действия такого искусственного транслятора на эту матрицу (справа). Отчетливо видно, что изображение буквы G было транслировано в знак «+».

Операция трансляции изображений в голографии соответствует операциям дешифрации и перекодировки в вычислительной технике. Рассмотренные математические операции, осуществляемые с помощью оптики, т. е. умножение, преобразование Фурье, идентификация и трансляция, позволяют производить практически любые вычисления, а это означает, что на основе голографии можно создать универсальные вычислительные машины.

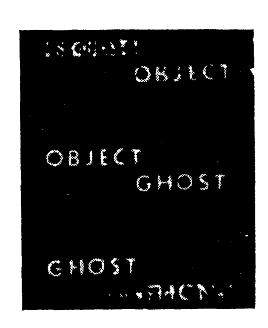


Рис. 30. Результат действия двумерного транслятора, состоящего из голограммы Фурье и компенсирующего негатива.



Рис. 31. Результат действия искусственной голограммы— двумерного транслятора, переводящего букву *G* в знак «+».

Представим сначала, как можно на основе рассмотренных методов построить оптический процессор. Входные данные в процессор (рис. 32) вводятся в виде пучка пространственно-модулированного света, что осуществляется входным преобразователем *1*. За преобразователем располагается решающая среда *2*, представляющая собой в простейшем случае набор трафаретов, комплексно-сопряженных фильтров, компенсирующих негативов. Этот набор в зависимости от типа решаемых задач должен соответствующим образом перестраиваться. Стоящий на выходе преобразователь *3* принимает из решающей среды оптические сигналы и преобразует их в электрическую или какую-либо другую форму, в которой они воспринимаются оператором или исполнительными механизмами.

В любой вычислительной машине кроме процессора существует ряд других устройств: запоминающие устройства различного назначения, устройства ввода и вывода данных и т. п. Современное состояние техники не позволяет создать все эти устройства с применением только оптических элементов, поэтому в существующих оптических вычислительных машинах наряду с оптическими элементами используются элементы обычной электронной техники.

Основной проблемой при создании оптической вычислительной машины являются ввод и вывод информации. Для того чтобы пространственно промодулировать пучок света, в оптике поступают просто: на пути пучка ставят транспарант с требуемым пространственным распределением коэффициента пропускания. Для изготовления такого транспаранта требуется время, да и механическая замена одного транспаранта другим — процесс достаточно медленный. Поэтому для создания пространственных модуляторов в последнее время все чаще применяют термопластические, электрооптические и магнитооптические пленки, поляризационно-оптические и другие материалы, которые могут быстро изменять коэффициенты пропускания или отражения, поляризацию проходящих или падающих лучей света под действием электронного пучка, тока или напряжения.

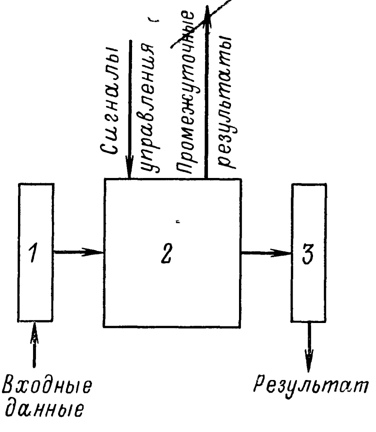


Рис. 32. Блок-схема оптического процессора.

Примером быстродействующего пространственного модулятора света является разработанный американской фирмой *Perkin — Elmer* мембранный модулятор света (ММС). Простейший ММС состоит из металлизированного слоя полимера, нанесенного на плоскую подложку с большим количеством микроскопических отверстий. В невозбужденном состоянии ММС отражает лазерный луч без искажений. Подаваемые на ММС управляющие электрические сигналы вызывают «рябь» в полимерной пленке и модулируют таким образом падающий на нее лазерный луч, что позволяет ввести требуемый сигнал в оптический процессор.

На площади в 1 *мм*^{2} обычно можно расположить несколько сотен мембранных элементов, так что модулятор площадью в 1 *см*^{2} позволяет вводить в оптическую вычислительную машину (ОВМ) одновременно около тысячи двоичных единиц информации. Управление осуществляется при помощи интегральных логических схем, что позволяет изменять состояние модулятора за доли микросекунды, а также создавать единые электронно-оптические устройства для модуляции света. Включение в такое устройство фоточувствительных элементов дает возможность управлять ММС с помощью световых сигналов, что особенно ценно при использовании ММС в качестве управляемого трафарета или пространственного фильтра в решающей среде процессора.

Решающая среда, содержащая линзы, постоянные и управляемые пространственные фильтры, трафареты и модуляторы, теоретически может решать любую задачу, подвластную существующим электронно-вычислительным машинам. Однако трудности, связанные с созданием среды, допускающей быстрое изменение ее состояния, не позволяют в настоящее время реализовать универсальную ОВМ. Несмотря на это, специализированные оптические вычислительные

устройства имеют быстродействие, во много раз превышающее возможности ЭВМ аналогичного назначения. Так, например, оптическая вычислительная машина фирмы *Perkin — Elmer*, предназначенная для получения преобразований Фурье-функций, выраженной 38 значениями фазы, затрачивает 1 *мксек* на одно вычисление. Выполнение подобных расчетов с помощью самых совершенных ЭВМ занимает в 100 раз больше времени и требует значительно больших мощностей питания.

Запоминающие устройства

Процесс записи интерференционной картины (голограммы) на фотопластинку можно представить как запоминание некоторого количества информации в фоточувствительной среде, а процесс восстановления — как считывание этой информации. Поэтому часто говорят об информационной емкости голограммы, понимая под этим максимальное количество информации, которое может храниться на данной голограмме. Эта величина будет тем больше, чем с большей плотностью информация записывается на носитель (фоточувствительную среду) и чем больше размеры самой голограммы.

Как известно, информация об объекте фиксируется на голограмме в виде совокупности интерференционных полос, причем расстояние между соседними полосами имеет порядок длины волны света, используемого в процессе получения голограммы. Следовательно, максимально возможная плотность записи информации обратно пропорциональна квадрату длины волны света с коэффициентом пропорциональности порядка единицы. Например, если используется красный свет (длина волны равна 0,63 *мкм*$=0{,}63\cdot10^{-4}$ *см*), то на 1 *см*^{2} голограммы можно записать до $3\cdot10^8$ *бит*. При этом, естественно, предполагается, что фоточувствительный материал, на который записывается голограмма, обладает разрешающей способностью, превышающей 2 000 линий на 1 *мм*. Такие материалы, как указывалось ранее, существуют и широко используются в голографии.

На практике, однако, реализовать столь высокую плотность записи не удается. Это объясняется тем, что лазерное излучение с ограниченной пространственной и временно́й когерентностью вызывает смазывание интерференционной картины и уменьшение контрастности, так как особо мелкие детали восстановить становится невозможно. На уменьшении контрастности сказываются также различного рода пространственные шумы, заключающиеся в наличии на голограмме трещин, пыли и других дефектов. Некоторое ограничение плотности записи обусловливается также несовершенством входящих в состав голографических установок оптических приборов, например объективов, применяемых при изготовлении голограмм Фурье. Кроме того, для увеличения надежности практических систем приходится вводить различные коэффициенты запаса, что также уменьшает плотность записи.

Поэтому практически достижимой плотностью записи информации на голограмму в настоящее время можно считать величину порядка $3\cdot10^6$ *бит/см*^{2}.

Вторым фактором, определяющим информационную емкость голограммы, является ее размер. Оказывается, что он тоже ограничен. Дело в том, что во всех известных системах голографических запоминающих устройств применяются оптические элементы (линзы объектива или электрооптической системы отклонения луча лазера),

размеры которых должны быть сравнимы с размерами голограммы. В настоящее время практически невозможно изготовить качественную линзу диаметром более 20—30 *см*. Отсюда следует, что максимальная площадь голограммы может составлять несколько сотен квадратных сантиметров, а ее информационная емкость — около 10^9 *бит*.

Одним из возможных способов увеличения информационной емкости может служить использование объемных голограмм, полу-

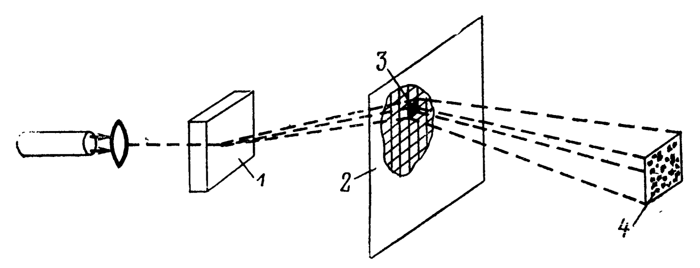


Рис. 33. Схема голографического постоянного запоминающего устройства фирмы *Bell*.

чаемых, например, путем фотографирования на фотопластинку с толстым эмульсионным слоем нескольких голограмм, ориентированных под разными углами или сформированных с помощью света с разной длиной волны. При считывании изображения, получающиеся с разных голограмм, разделяются в пространстве или считываются только светом с определенной длиной волны. Таким способом можно увеличить удельную информационную емкость голограммы более чем на порядок.

Однако повышенный интерес к голографическим запоминающим устройствам объясняется не только большой информационной емкостью голограмм. Основным решающим фактором является большая помехоустойчивость голографической записи, о которой упоминалось выше. При наличии на голограмме таких помех, как пыль, царапины и т. п., потеря информации проявляется в виде уменьшения четкости границ и уменьшения градаций яркости между отдельными элементами изображения.

К настоящему времени разработано несколько схем голографических запоминающих устройств как постоянных, так и оперативных. Основой большинства постоянных запоминающих устройств является фотопластинка, на которой записан ряд голограмм, восстанавливаемых лучом лазера, который отклоняется на участок, где находится нужная голограмма. Восстановленное изображение обычно проектируется на матрицу из светочувствительных элементов, преобразующих распределение освещенности в электрические сигналы.

На рис. 33 представлена схема голографического запоминающего устройства, предложенная американской фирмой *Bell*. Одна фотопластинка *2* этого запоминающего устройства содержит 256 отдельных голограмм *3* в виде матрицы 16×16. Диаметр каждой голограммы равен 1,5 *мм*, расстояние между соседними голограммами — 0,5 *мм*. На каждой голограмме записан трафарет, состоящий из 6 000 темных и светлых квадратов. Выбор голограммы осуществляется путем отклонения луча лазера в направлении на одну из 256 го-

лограмм. При освещении голограммы восстанавливается изображение трафарета в плоскости считывания *4*, где находится матрица из 6 000 фототранзисторов, преобразующих падающий на них световой поток в электрические сигналы. Источником когерентного излучения здесь служит гелий-неоновый лазер. Смещение луча лазера по осям *x* и *y* осуществляется с помощью двух акустических отклоняющих устройств *1*, которые представляют собой заполненные водой ячейки с ультразвуковыми преобразователями. Под действием звукового сигнала в воде возникают стоячие волны, образующие дифракционную решетку из слоев с разными коэффициентами преломления, причем шаг ее зависит от частоты сигнала звукового датчика. Угол отклонения лазерного луча зависит от шага решетки, наведение луча лазера на нужную голограмму занимает около 15 *мксек*. Несмотря на потери света в оптической системе, при мощности лазера 80 *мвт* с матрицы фотоприемников устойчиво снимаются электрические сигналы. Частицы пыли и грязи, оседающие в оптической системе и на фотопластинке, практически не влияют на качество считывания.

Схема выборки позволяет считывать одновременно 6 000 двоичных единиц. Поскольку для существующих вычислительных машин не требуется сразу такое количество информации, предусмотрена вторая ступень выборки, выбирающая из 6 000 двоичных единиц требуемые несколько десятков.

Различные модификации постоянных голографических запоминающих устройств в большинстве не отличаются по построению функциональной схемы от запоминающего устройства, изображенного на рис. 33. Конструктивные отличия определяются только разными типами устройств отклонения луча (дефлекторов), запоминающих сред и устройств преобразования оптических сигналов в электрические. Например, в запоминающем устройстве японской фирмы *Hiachi* используются в качестве отклоняющего устройства кристаллы двуокиси теллура, после которых для равномерного распределения лучей в голограмме устанавливается пластина из нескольких слоев окиси церия. Благодаря этому получается равномерная голограмма, что позволяет записать $20 \cdot 10^3$ двоичных единиц на площади 0,5 *мм*^{2}. Такая плотность близка к теоретическому пределу, связанному с ограничениями, налагаемыми длиной волны и возможностями современной оптики и лазерной техники.

При создании оперативных голографических запоминающих устройств основной проблемой является получение запоминающей среды, которая позволила бы оперативно записывать и стирать интерференционные картины. С этой точки зрения в настоящее время перспективными считаются магнитные и ферроэлектрические среды. Например, пленка мелкоструктурного магнитного материала MnBi изменяет свои отражательные свойства (плоскость поляризации при отражении) за счет нагрева ее до температуры точки Кюри. Возврат пленки в исходное состояние можно осуществить воздействием магнитного поля. Другая оперативная запоминающая среда, ферроэлектрик $Bi_4Ti_3O_{12}$, в комбинации с фотопроводником образует запоминающую среду, которая меняет поляризацию отраженного луча света при одновременном воздействии света и электрического поля. Возвращение среды в исходное состояние осуществляется изменением электрического поля. Обе эти среды позволяют многократно записывать и стирать интерференционные картины.

Схема построения оперативных голографических запоминающих устройств приблизительно такая же, как и постоянных запоминаю-

щих устройств. Основная схемная разница заключается в наличии устройства для оперативной пространственной модуляции светового пучка и оптической системы для записи голограмм. В качестве примера рассмотрим развернутую в пространстве схему оперативного голографического запоминающего устройства емкостью 10^9 двоичных единиц, характеризующуюся рядом оригинальных технических реше-

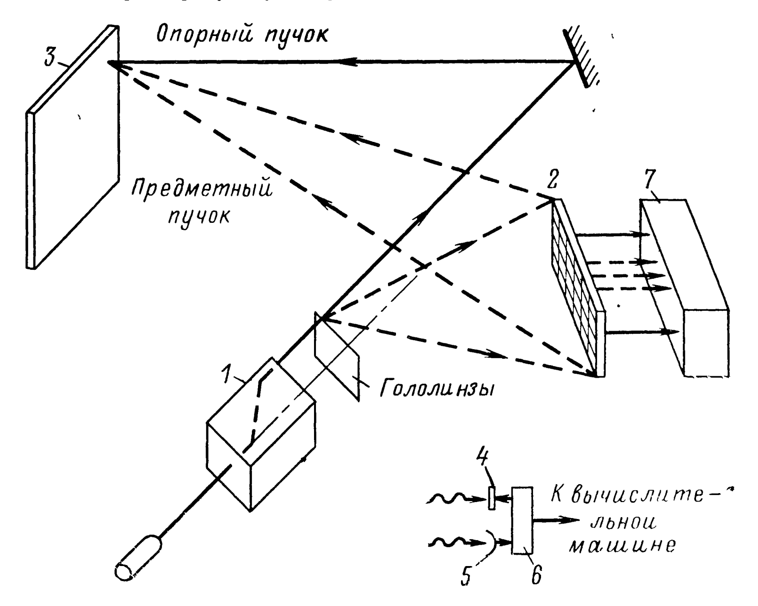


Рис. 34. Схема голографического оперативного запоминающего устройства емкостью 10^9 *бит*.

ний (рис. 34). Луч света от лазера проходит через устройство управления лучом *1*, которое совместно с набором гололинз формирует два пучка света — опорный пучок и пучок, освещающий устройство пространственной модуляции света, — латрицу *2* (latrix). Отраженный от латрицы пучок света (предметный пучок) попадает на запоминающую среду *3*. Оптическая система (на рисунке не показана) обеспечивает попадание предметного и опорного пучков в строго определенную область распределенной запоминающей среды. При освещении запоминающей среды опорным пучком эта же оптическая система обеспечивает проекцию изображения, записанного в запоминающей среде в виде голограммы, на латрицу.

Латрица *2* является наиболее интересной составной частью рассматриваемого запоминающего устройства. Функционально она представляет собой сравнительно небольшое состоящее из дискретных элементов запоминающее устройство, которое допускает запись и считывание как обычными электронными методами, так и с помощью света. Для обеспечения таких функциональных возможностей каждый элемент латрицы содержит оптический клапан *4*, фотоприемник *5* и электронную схему *6* (рис. 34). Электронная схема обеспечивает

запоминание приходящей на элемент информации и связь ячеек латрицы с вычислительной машиной 7. На рис. 35 представлено поперечное сечение двух ячеек латрицы. Между прозрачным проводящим слоем 5, нанесенным на стекло 2, и кремниевой пластинкой 4, содержащей электронную интегральную схему, заключен слой жидкого кристалла 3. Верхний слой каждого фотодиода, примыкающий к слою жидкого кристалла, служит одновременно зеркальной поверхностью, отражающей часть светового потока 1, и управляющим электродом оптического клапана на жидком кристалле.

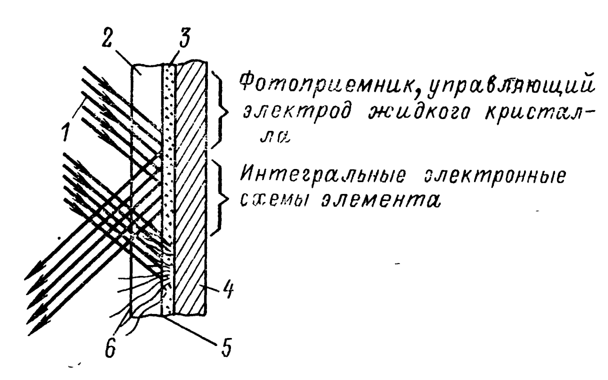


Рис. 35. Поперечное сечение двух элементов латрицы.

Если между фотодиодом и противоположным прозрачным электродом 5 не приложено напряжение, то слой жидкого кристалла находится в таком состоянии, когда свет проходит через него. В этом случае происходит зеркальное отражение падающего на элемент пучка света. Когда же на жидкий кристалл подается разность напряжений от интегральной схемы, то происходит рассеивание падающего на элемент света во все стороны 6. Поэтому мощность отраженного света от невозбужденного элемента во много раз больше, чем от возбужденного.

Рассматриваемое запоминающее устройство (рис. 34) имеет двухступенчатую схему запоминания. Первая ступень — латрица, вторая — распределенная запоминающая среда, обеспечивающая многократное повторение циклов запись — считывание — стирание. При записи информация сначала накапливается в латрице, а затем переносится в распределенную запоминающую среду. Считывание производится в обратном порядке: сначала считывается информация из запоминающей среды и переносится в латрицу, а затем с помощью электронных схем требуемый объем информации считывается из латрицы и вводится в цифровую вычислительную машину.

Оптическая система запоминающего устройства служит одновременно для записи и считывания (рис. 36). Стирание записанной информации (устройство стирания 9) может производиться путем локального перемагничивания магнитной пленки микромагнитами (в случае применения пленки MnBi в качестве запоминающей среды), расположенными за запоминающей средой 10. В случае применения ферроэлектрической запоминающей среды стирание произ-

водится изменением напряжения в области, где необходимо стереть информацию. В состав оптической системы входят поляризаторы, отклоняющая система, матрица голографических линз, зеркала, направляющие ход лучей, и объектив.

Электрооптический поляризатор *1*, установленный перед отклоняющим устройством *2*, изменяет поляризацию пучка в зависимости от операций в запоминающем устройстве, а постоянный поляризатор *7*, стоящий перед латрицей *6*, анализирует (пропускает или не пропускает) луч света от голографических линз *4*. Матрица голографи-

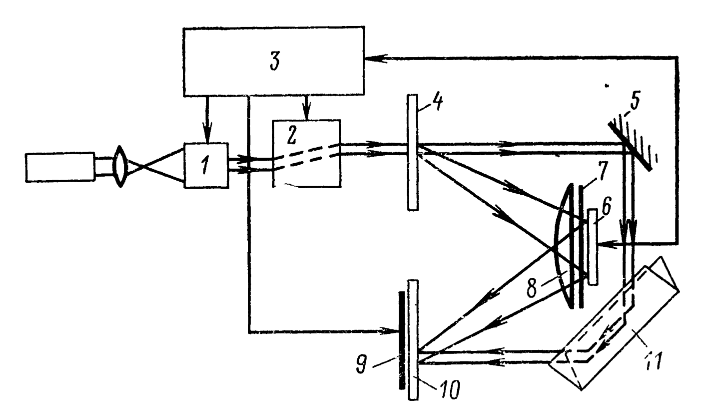


Рис. 36. Оптическая система голографического оперативного запоминающего устройства.

ческих линз играет роль дифракционного расщепителя, который за счет дифракции отделяет часть лазерного луча для освещения латрицы. Другая часть используется в качестве опорного пучка.

При записи луч света, прошедший отклоняющее устройство, поляризован перпендикулярно плоскости чертежа. Пучок нулевого порядка, прошедший через голографическую линзу, отклоняется на 90° плоским зеркалом *5*, а затем еще на 90° уголковым зеркалом *11*. В этом случае пучок нулевого порядка всегда падает нормально к плоскости запоминающей среды *10* и служит опорным пучком при записи голограммы. Уголковое зеркало перемещает опорный пучок вверх и вниз параллельно плоскости рисунка в зависимости от выбранной голографической линзы. Так, например, луч света, прошедший через верхнюю часть матрицы голографических линз, лежит ниже плоскости рисунка. Дифрагированный пучок от выбранной голографической линзы проходит через объектив *8* и поляризатор *7* и освещает систему оптических клапанов латрицы *6*. Клапаны, которые находятся в состоянии «включено», зеркально отражают свет, а клапаны, находящиеся в состоянии «выключено», рассеивают свет. Свет, отраженный от оптических клапанов, вторично проходит через поляризатор и объектив и попадает в выбранную область запоминающей среды, куда и записывается в виде голограммы.

При считывании записанных в запоминающей среде голограмм в отраженном свете действительное изображение проектируется на

латрицу. В этом случае запоминающая среда освещается считывающим пучком, который идет по тому же пути, что и опорный пучок при записи. Опорный пучок падает нормально к плоскости запоминающей среды, в связи с чем отсутствует необходимость применять разные пучки при считывании и записи. Луч света, идущий от голографической линзы к латрице, поляризован в плоскости рисунка. Поэтому получающийся при освещении голографической линзы дифрагированный пучок света не проходит на латрицу из-за установленного перед ней поляризатора, в то время как недифрагированный луч освещает в запоминающей среде выбранную голограмму. При восстановлении выбранной голограммы вследствие эффекта Керра пучок первого порядка, идущий от запоминающей среды, поляризуется по отношению к фронту падающей волны ортогонально и проходит по пути информационного пучка в обратном направлении. Таким образом, восстановленное изображение после прохождения через поляризатор проектируется на поверхность латрицы. В фотоприемнике возбуждается сигнал, пропорциональный интенсивности освещения элемента латрицы, который поступает на триггер, входящий в состав полупроводникового запоминающего устройства латрицы. С триггеров латрицы информация считывается в вычислительную машину *3*.

Несмотря на двухступенчатость процесса обращения, это запоминающее устройство обеспечивает высокое быстродействие системы в целом. Вычислительная машина может нормально функционировать, используя только внутреннюю транзисторную память латрицы, и периодически обновлять записанную в ней информацию с помощью распределенной запоминающей среды. Поэтому рассмотренное голографическое запоминающее устройство обладает всеми достоинствами голографического метода запоминания (высокая помехозащищенность, большая плотность записи и т. п.) и обеспечивает не меньшую скорость обработки информации, чем вычислительные машины, использующие только электронные запоминающие устройства.

Повышению плотности записи информации в настоящее время уделяется самое пристальное внимание, так как оно позволяет уменьшить габариты запоминающих устройств, что является одной из насущных задач современной вычислительной техники. Поэтому в этом направлении ведутся интенсивные исследования. Специалисты фирмы *Bell* провели эксперименты по созданию голографического запоминающего устройства с записью голограмм в кристалле ниобата лития. Исследования показали, что в кристалле размером в 1 *см*^{3} можно записать около 1 000 голограмм, содержащих цифровые и графические данные. В проведенных экспериментах кубический кристалл помещался на вращающейся подставке. Затем в него записывалась голограмма. После записи каждой голограммы в одной из плоскостей кристалла его поворачивали на угол, составляющий доли градуса, и производили запись следующей голограммы. Голограммы, записанные в кристалле ниобата лития, можно стереть нагреванием кристалла до 170 °С. Поэтому такой кристалл можно многократно использовать для накопления информации.

В последнее время проявляется повышенный интерес к запоминающим устройствам ассоциативного типа, в которых информация записывается и считывается по заданному признаку. Рассмотренная в предыдущем параграфе операция трансляции, выполняемая с помощью голографии, позволяет осуществить такой поиск и считывание. Поэтому ассоциативные голографические запоминающие устройства считаются одним из перспективных применений голографии

в вычислительной технике. Идея построения ассоциативного голографического запоминающего устройства состоит в том, что в светочувствительной среде записывается голограмма при интерференции пучков света от двух образов, один из которых является признаком, а другой несет полезную информацию. На светочувствительной среде записывается множество малых голограмм с разными признаками.

Если теперь осветить такую суммарную голограмму пучком света от одного образа — признака, то появится только тот информационный образ, который соответствует данному образу — признаку. Информационный образ представляет собой такой же трафарет, как и в случае рассмотренных запоминающих устройств с адресным обращением. Этот трафарет проектируется на матрицу фотоприемников, преобразующих световые сигналы в электрические. В отличие от запоминающих устройств с адресным обращением здесь можно обойтись без отклоняющей системы. Для ассоциативного поиска достаточно пространственно промодулировать освещающий голограмму пучок света в соответствии с образом — признаком. Это можно осуществить с помощью пространственных модуляторов света, описанных в предыдущей главе.

Цифровая голография

Цифровой голографией называется метод получения и восстановления голограмм, при котором основная роль отводится цифровой вычислительной машине. Роль вычислительной машины заключается в расчете распределения коэффициента прозрачности или преломления по полю голограммы, которое затем записывается тем или иным способом в запоминающей среде. С помощью вычислительной машины рассчитывается и восстанавливается изображение, которое записано на такой синтезированной голограмме и которое можно было бы получить оптическим путем.

Имеется ряд веских оснований для такого синтеза голограмм и, в частности, то обстоятельство, что геометрические размеры голографического объекта в этом случае не ограничиваются такими факторами, как когерентность освещения, вибрация или турбулентность воздуха, и появляется возможность исследовать путем моделирования некоторые голографические эффекты.

Еще более существенным моментом, стимулирующим синтезирование голограмм с помощью цифровых вычислительных машин, является возможность создать оптический волновой фронт для такого объекта, который физически не существует. Потребность в формировании волнового фронта, соответствующего объекту, определяемому расчетным путем, возникает в любом случае, когда требуется визуально отобразить в трех измерениях результаты того или иного трехмерного исследования, например при моделировании разрабатываемых конструкций. Иногда волновой фронт от синтезированной голограммы может служить интерференционным эталоном для контроля сложной оптической поверхности в процессе ее обработки. Другая область применения таких голограмм связана с экспериментами по пространственной фильтрации. В некоторых случаях изготовить фильтр с заданной функцией оптическими методами бывает затруднительно, в то же время вычислительная машина решает подобные задачи сравнительно легко.

Процесс синтеза голограммы в общем случае состоит из четырех этапов. Сначала вычисляется распределение амплитуды и фазы оптических волн (т. е. комплексной амплитуды) в пространстве между объектом и плоскостью голограммы, а затем рассчитывается и формируется картина голограммы на графическом выходном устройстве. Заключительными этапами процесса являются запись расчетной картины (голограммы) и уменьшение ее до размеров, обеспечивающих дифракцию света. Для формирования голограммы применяются электронно-лучевые трубки, штриховые печатающие устройства, механические графопостроители. Заключительный этап, фотографическое уменьшение, разумеется, может быть исключен, если применить специальные выходные устройства, позволяющие осуществить непосредственную запись голограммы требуемого размера. Функция голограммы, получаемой при помощи вычислительной машины, состоит в сущности в том, чтобы создать волновой фронт на основе ряда вычисленных данных. Если можно было бы поместить в каждой точке голограммы очень малую антенну и возбуждать ее сигналом с правильно подобранной амплитудой и фазой, то генерировался бы заданный волновой фронт. Однако сконструировать такую антенную решетку, которая излучала бы на оптических частотах, весьма нелегко.

Необходимо, однако, отметить, что хотя быстродействие существующих в настоящее время цифровых вычислительных машин довольно велико, оно все же недостаточно для того, чтобы рассчитать в практически приемлемые сроки синтезируемую голограмму, полностью идентичную голограмме, получаемой при записи интерференционной картины, создаваемой реальным объектом. Поэтому в большинстве случаев рассчитываются голограммы, где отсутствуют полутона и вся голограмма состоит из светлых участков (апертур) на черном фоне. Такая голограмма называется бинарной. На рис. 37 представлены функции распределения прозрачности обычной (серой) голограммы (*а*) и бинарной (*б*). Бинарную голограмму с помощью вычислительной машины можно рассчитать и построить в увеличенном масштабе за несколько минут.

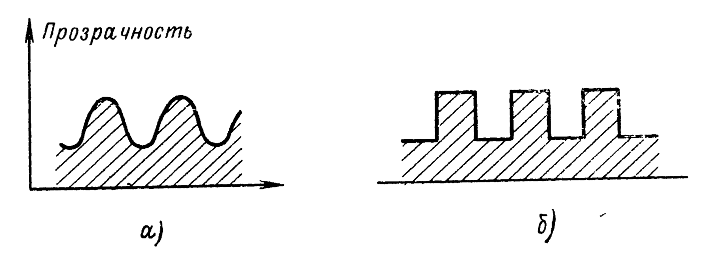


Рис. 37. Оптическое пропускание обычной (*а*) и бинарной (*б*) голограмм.

Фотографическое уменьшение и репродуцирование бинарных голограмм легче и более точно, чем серых голограмм. На качество бинарной голограммы совершенно не влияют нелинейные фотографические эффекты, поэтому в процессе фотоуменьшения бинарных голограмм требуется значительно менее строгий контроль величины экспозиции и режима проявления.

Другое преимущество бинарной голограммы по сравнению с серой голограммой состоит в том, что она направляет на восстанавливаемое изображение бо́льшую часть из падающего на нее света. Если в обычной голограмме светоотдача, или эффективность, равна

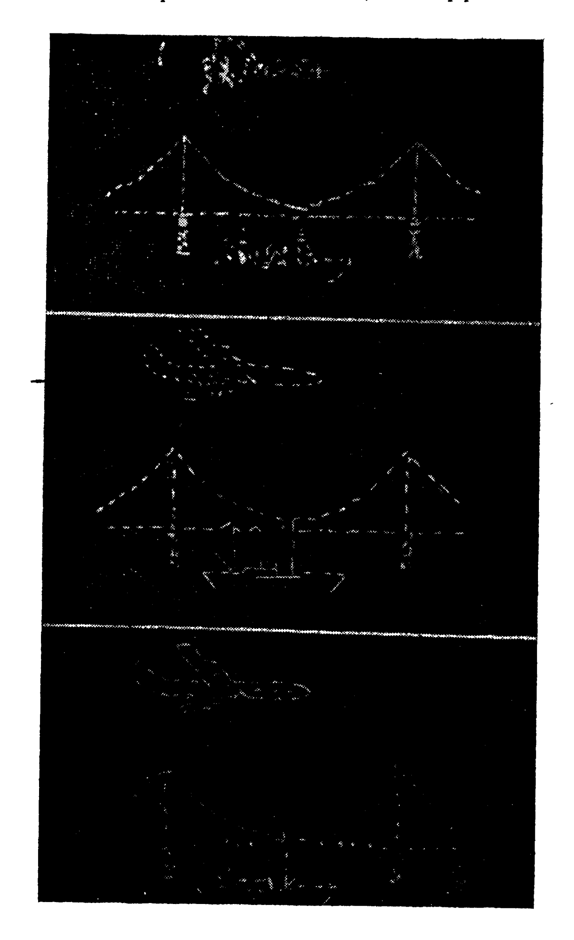


Рис. 38. Трехмерное восстановленное изображение с бинарной голограммы, состоящее из трех плоскостей на разных уровнях глубины объекта.

6,2%, то светоотдача бинарной голограммы достигает 10%. Фазовые (отбеленные) голограммы имеют светоотдачу 34%, а фазовые бинарные — 41%. Помимо более высокой светоотдачи преимущество бинарной голограммы состоит в том, что при восстановлении возникает меньше шумов от света, рассеянного зернистой структурой фотоэмульсии.

Бинарная голограмма может быть вычерчена на графопостроителе. В этом случае апертуры будут иметь вид прямоугольника с различной высотой. Расчет бинарной голограммы, содержащей 16 000 апертур, на вычислительной машине типа IBM-360 модель 50, занимает от 4 до 8 *мин* в зависимости от сложности голографируемого объекта. Картина голограммы размером 70×70 *см* с помощью графопостроителя типа *Cal Comp*-565 вычерчивается за 40 *мин* и затем фотографируется с уменьшением в 180 раз на мелкозернистую пленку. Полученные таким образом голограммы имеют размер 4×4 *мм* при среднем расстоянии между апертурами 0,03 *мм*.

Восстановленное с бинарной голограммы в когерентном свете изображение имеет все свойства изображения, получаемого с обычной голограммы. На рис. 38 представлено трехмерное изображение, восстановленное с бинарной голограммы, которое состоит из трех плоскостей, проходящих на разных уровнях глубины пространства. В зависимости от наводки на резкость и диафрагмы на пленке фиксируется изображение в той или иной плоскости.

Бинарные голограммы являются эффективным промежуточным звеном, позволяющим осуществить связь между цифровой и оптической формами представления информации. Один из методов цифровой голографии позволяет получать голограммы, которые при восстановлении почти весь свет, падающий на голограмму, направляют на создание одного изображения, т. е. имеют эффективность около 100%. Такая голограмма была названа киноформом.

В заключение обратим внимание на то, что в случае цифровой голографии вычислительная машина играет роль оптического элемента, причем, как мы убедились, она выполняет функции оптических элементов часто много лучше, чем реальные оптические элементы.

Распознавание образов

Распознавание образов является одной из важнейших задач кибернетики. В настоящее время этот вид задач решается, в основном, при помощи вычислительных машин путем сравнения некоторого количества информации, приходящего на вход устройства распознавания, с известной информацией (образом), хранящейся в памяти ЭВМ в зашифрованном виде. Эти задачи очень трудоемки, причем основные трудности машинного процесса распознавания заключаются в том, что для ввода информации об исследуемом образе в ЭВМ его необходимо представить в двоичной форме, описав требуемым для распознавания минимумом двоичных единиц. Если исследуется большое количество образов, то приходится перерабатывать огромный объем информации. Поэтому часто распознавание простейших образов, таких, как буквы, цифры, несложные геометрические фигуры, занимает столь большое время даже при высоком быстродействии вычислительных машин, что выполнять такую работу с их помощью становится нецелесообразно.

Вместе с тем ввод данных в ЭВМ в форме печатного или даже рукописного текста и других символов во многих случаях очень важен. Прежде всего эта задача сводится к распознаванию и выделению отдельных символов, и если она будет решена, то дальнейшие операции, т. е. присвоение символу кода и ввод его в вычислительную машину, уже не представляет особых трудностей.

Для голографических систем считывания символов большинства проблем, возникающих в других системах распознавания, либо вооб-

ще не существует, либо они легко устраняются. Здесь не требуется сканирования входных сигналов с помощью фильтра или шаблона; небольшие смещения символа не имеют существенного значения; допускаются значительные изменения размеров и ориентации вводимых в графической форме данных. Степень селективности символов можно регулировать.

В основе голографического метода распознавания образов или считывания определенных символов лежит метод оптимальной пространственной фильтрации с применением комплексно-сопряженных

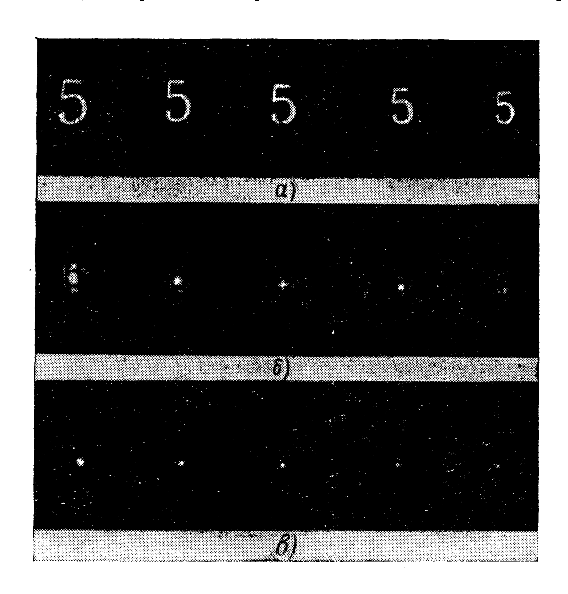


Рис. 39. Влияние изменения величины сигнала на качество опознавания.

а — входные сигналы; *б* — выход широкополосного фильтра; *в* — выход фильтра нижних частот.

фильтров. При создании простейшего голографического устройства распознавания каждый хранящийся в памяти ЭВМ символ записывается на отдельном фильтре и входная информация обрабатывается последовательно. Положения ярких точек, соответствующих выбранному (распознанному) символу, записываются в ЭВМ, считываются в определенной последовательности в конце цикла считывания и фиксируются на магнитной ленте. Недостатком такого метода является необходимость механической смены фильтров в процессе распознавания, однако он оказывается очень полезным, когда ведется поиск отдельных слов или последовательностей слов и нет необходимости в быстрой смене фильтров.

Можно также записать все хранящиеся в памяти ЭВМ символы на одном фильтре и подавать на вход одновременно только один неизвестный символ. Такой метод, очевидно, аналогичен предыдущему, только роли входной и выходной плоскостей взаимно поменя-

лись. Преимущество этого метода состоит в том, что допуск на положение входного символа, как правило, гораздо менее жесткий, чем допуск на фильтр. Однако это преимущество можно реализовать только в том случае, когда последовательное представление неизвестных символов оказывается менее сложным, чем смена фильтров.

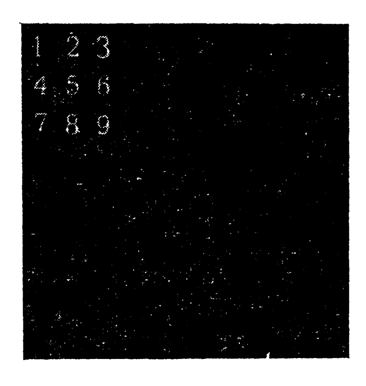


Рис. 40. Последовательность цифр, подлежащая обработке.

Рис. 41. Трафарет, с которого изготавливается пространственный фильтр.

Система распознавания должна обеспечивать безошибочное выделение искомых символов из любого множества. Однако как печатные, так и рукописные символы могут отличаться размерами,

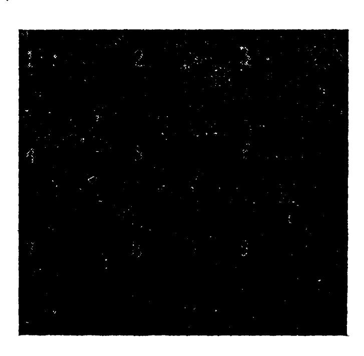


Рис. 42. Результат обработки последовательности цифр, изображенной на рис. 40, с помощью пространственного фильтра, изготовленного с трафарета рис. 41.

ориентацией и качеством изображения. Поэтому для распознавания одного символа часто применяется не один фильтр, а набор фильтров, отличающихся друг от друга полосой содержащихся в них пространственных частот. В зависимости от этой полосы фильтра интенсивность отклика (реакция) на символ при различных отклонениях в изображении символа будет различной (рис. 39). Отклик фильтров будет различным и при изменении ориентации символов, а также при искажениях символов, определяемых качеством печати.

OPTICS. The study of optics is usually divide into three parts: physical optics, physiological optics and geometrical optics. Physical optics is primarily concerned with the nature and properties of light itself and is treated under LIGHT. Physiological optics deals with the mechanism of vision, and is treated under VISION.

Geometrical optics, which is the subject of this article, is the name applied to that part of optics which deals with the properties of optical instruments such as telescopes, microscopes, photographic lenses, spectroscopes and the elementary lenses, mirrors and prisms from which they are constructed.

a)

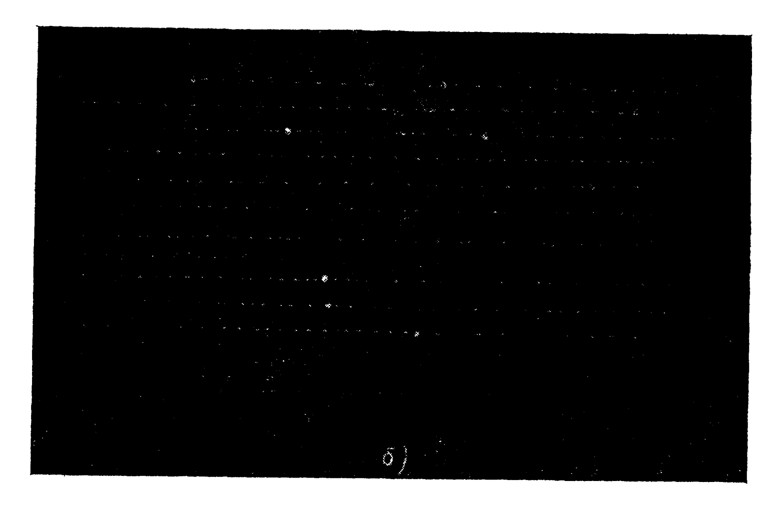


Рис. 43. Выделение ключевого слова в тексте.
а — входной текст; *б* — выделение слова *optics*.

К сожалению, в практических системах распознавания искажение символов из-за плохого качества печати наиболее вероятно и поэтому желательно принимать дополнительные меры для обеспечения постоянства качества начертания знаков.

После рассмотрения простого примера, иллюстрирующего работу комплексно-сопряженных пространственных фильтров, перейдем к рассмотрению такой проблемы: как сделать систему, чтобы один единственный фильтр содержал информацию о многих символах и

в то же время позволял обрабатывать значительное количество информации?

Предположим, что необходимо сделать систему для распознавания девяти цифр, расположенных так, как показано на рис. 40. Для этого изготовляется трафарет (рис. 41), цифры на котором расположены на значительном расстоянии друг от друга так, чтобы в область между соседними символами могла поместиться анализируемая последовательность цифр. С этого трафарета изготовляется пространственный фильтр. Затем транспарант с последовательностью цифр, подлежащих распознаванию (рис. 40), и пространственный фильтр помещают в схему, представленную на рис. 12.

На рис. 42 видны девять пятен, соответствующих девяти цифрам анализируемой последовательности. Для наглядности на этом же



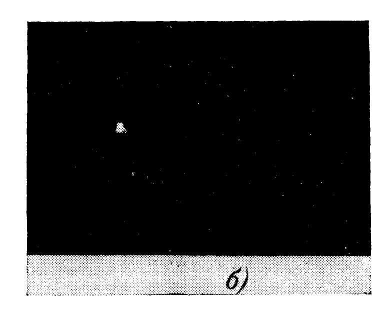


Рис. 44. Выделение желаемого отпечатка пальца из двух почти идентичных.

а — исходные данные; *б* — результат фильтрации.

рисунке приведен трафарет, с которого изготовлялся пространственный фильтр. Каждому пятну соответствует своя цифра. Если часть цифр убрать, то соответствующие им пятна исчезнут.

В качестве еще одного примера распознавания образов с помощью голографии можно назвать создание фильтров для выделения слов в печатном тексте. Система с такими фильтрами может найти применение при сортировке писем и в других аналогичных случаях отбора текстовых материалов. Она может также оказаться полезной при операциях выделения и каталогирования, когда производится поиск некоторого ключевого слова. На рис. 43,*а* приводится часть текста, взятого из энциклопедии *Britannica*. Здесь ключевое слово — *optics*. На рис. 43,*б* приведена плоскость откликов, где положение ярких точек соответствует слову *optics*. Данный фильтр дает также отклик на слова *optical* и *applied*, которые довольно схожи со словом *optics*, однако ни один из этих откликов не имеет такой яркости, как отклик на слово *optics*. Поэтому пороговое устройство легко может отделить их по степени яркости.

Используя голографические комплексно-сопряженные фильтры, можно создать оптическую систему считывания знаков, с помощью которой печатный текст можно вводить в ЭВМ непосредственно с листа. Несмотря на кажущуюся простоту, задача ввода символов в машину достаточно сложна, так как в плоскости откликов может быть несколько сотен ярких пятен.

Возможности голографии с точки зрения распознавания образов особенно ярко проявляются в тех случаях, когда образ закодирован большим количеством информации. Действительно, если буквы или цифры можно выразить с помощью нескольких двоичных единиц, то чертеж или рисунок требует для кодирования тысяч и десятков тысяч двоичных единиц, а отпечаток пальца — даже сотен тысяч двоичных единиц. Однако, как уже указывалось, фотопластинка позволяет записать много большее количество информации. На рис. 44 представлены два отпечатка пальцев (*а*) и результат фильтрации (*б*). Можно заметить, что отпечатки очень похожи друг на друга. Однако фильтр выделяет только тот отпечаток, по которому он изготовлен.

РАДИОГОЛОГРАФИЯ

Голография имеет много общего с радиотехническими методами, многие из которых в той или иной степени близки к голографии как по основным идеям, так и по их математическому описанию. Более того, в тех случаях, когда для осуществления этих методов используются когерентные оптические системы, становится особенно очевидным, что в радиотехнике и голографии есть много общего. Поэтому не случайно, что по мере развития голографии в печати стали появлятся сообщения об экспериментах по применению голографических методов в радиодиапазоне.

Эта радиоголография представляет собой, с одной стороны, аналогию оптической голографии, так как в ней используются голографические методы, непосредственно перенесенные из оптического диапазона в диапазон радиоволн. С другой стороны, оптическая голография и радиотехника взаимно дополняют друг друга, давая возможность создавать устройства с характеристиками, которые невозможно получить, используя только оптическую голографию или только радиотехнические устройства. Судя по всему, в настоящее время наибольший интерес представляет именно совместное применение этих методов, своего рода симбиоз голографии и радиотехники, что заставляет специалистов по радиотехнике особенно пристально следить за исследованиями, связанными с голографией в видимом участке оптического диапазона, чтобы иметь возможность использовать полученные достижения в диапазоне радиочастот.

Радиовидение

Радиоволны, так же как и волны оптического диапазона, могут образовывать интерференционные картины. Картина, получающаяся при интерференции двух радиоволн (отраженной от предмета и опорной), содержит в себе информацию о предмете, которую можно преобразовать в видимое изображение. Это свойство радиоволн является основой для построения устройств радиовидения, т. е. устройств, которые в отличие от радиолокации не только устанавливают местоположение объекта, но и позволяют увидеть форму и оценить размеры объекта. В отличие от оптического излучения для высокочастотной энергии непрозрачность материалов для света не является препятствием.

Основная проблема, от решения которой зависит практическое использование методов радиовидения, заключается в необходимости

разработки специальных материалов, чувствительных к радиоволнам (своего рода детекторов), для записи радиоголограмм. В оптической голографии такая проблема не возникала: фотоматериалы были известны давно и оставалось только их применить. Для радиовидения материалы, сопоставимые по своим рабочим характеристикам с фотоэмульсиями, пока еще только создаются. Кроме того, оптическая голография позволяет в процессе восстановления голограммы получить видимое изображение объекта, а собственно радиовидение представляет информацию об объекте в таком виде, что для оценки оператором ее необходимо преобразовать, чтобы получить видимое изображение.

Существуют несколько способов записи радиоголограмм. Радиоголограммы могут быть записаны таким же способом, как и оптические голограммы (рис. 45). Можно записать радиоголограмму в жидких кристаллах, используя их свойства изменять прозрачность при

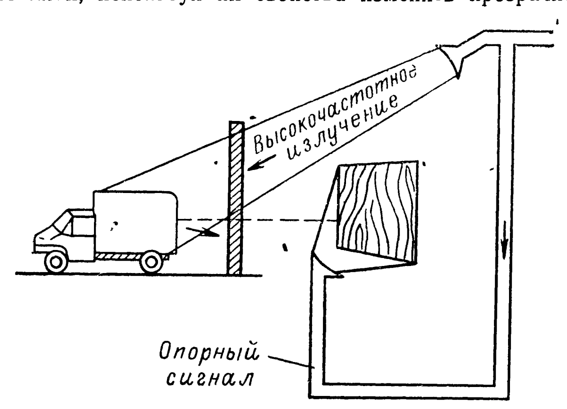


Рис. 45. Метод записи радиоголограммы объекта.

нагревании под воздействием радиоволн. В этом случае детектор для записи радиоголограммы изготавливается в виде однородной пластины размером в несколько квадратных метров.

Пластина изготовляется следующим образом: на майларовую пленку наносится слой жидкого кристалла, изменяющего свой цвет при изменении температуры. Поэтому под воздействием высокочастотного поля температура тех участков пленки с кристаллом, где существует высокая плотность электромагнитной энергии, повышается и они изменяют свою окраску. Эта цветная интерференционная картина с пластины фотографируется и уменьшается до размеров обычной оптической голограммы.

Частота радиоизлучения, его мощность и чувствительность пластины-детектора являются теми основными параметрами, которые наиболее существенно влияют на качество восстановленных изображений. Более высокая частота обеспечивает лучшую разрешающую способность. Нельзя, например, получить изображение пепельницы длиной 100 *мм*, используя источник, излучающий колебания с длиной волны 30 *см*. При уменьшении длины волны в 1 000 раз можно уже получить хорошее изображение пепельницы, так как на ее длине будет укладываться около 300 λ. Поэтому тип источника излучения

выбирается исходя из того, какой объект необходимо голографировать. Чтобы получить удовлетворительный уровень отраженного от объекта сигнала на требуемом расстоянии, мощность источника должна быть достаточно большой. Не следует упускать из виду еще один весьма существенный фактор. Если в лабораторных условиях ничто не мешает использовать очень короткие волны, то при работе

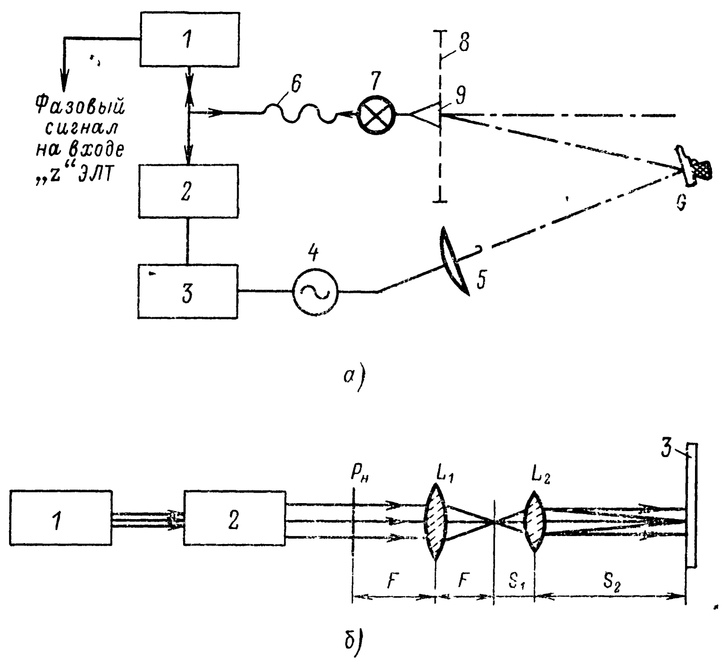


Рис. 46. Схема записи фазовых голограмм объектов в миллиметровом диапазоне волн (*а*) и оптическая схема для восстановления изображения (*б*).

1 — приемник; *2* — схема автоподстройки фазы; *3* — блок питания клистрона; *4* — клистрон на 70 *Ггц*; *5* — излучатель; *6* — гибкий коаксиальный кабель; *7* — смеситель на гармониках; *8* — апертура записи голограммы; *9* — сканирующий рупор (на рис 46,*а*).

1 — гелий-неоновый лазер; *2* — пространственный фильтр и коллиматор; *3* — проекционный экран или фотопластинка (на рис 46,*б*).

на открытом воздухе необходимо учитывать затухание их в атмосфере. В силу этого для работы вне стен лаборатории приходится использовать более длинноволновое излучение.

В качестве параметра, характеризующего связь частоты и мощности излучения с рабочими характеристиками пластины-детектора, можно рассматривать произведение $N=fP$, где f — частота, *Ггц*, а P — мощность, *вт*. Основная задача здесь — получить максимальную величину N. Применяя лампы бегущей волны, можно получить величину $N=10^4$ *Ггц·вт*. Это меньше, чем можно получить в оптической голографии, где средняя величина N составляет $5\cdot10^5$ *Ггц*×*вт*.

Для фиксации интерференционной картины может быть использована решетка (матрица) радиодетекторов. Если размеры пластины с жидкими кристаллами ограничены в силу требований их технологической однородности, то матрицу можно сделать сколь угодно большой. Правда, здесь имеются свои проблемы: взаимодействие между детекторами, искажения структуры поля за счет обратной связи между входными и выходными сигналами, перекрестные помехи. Однако в этом случае выходной сигнал сразу преобразуется в электрический, его можно передать по каналу связи и получить голограмму на экране телевизионной трубки.

Наряду с этими двумя методами фиксации распределения электромагнитного поля в радиовидении успешно применяется способ записи радиоголограмм методом сканирования. В этом случае высокочастотная энергия интерференционного поля воспринимается зондом, который с помощью электронной схемы управления просматривает данную область пространства последовательно точку за точкой. Данные измерений затем обрабатываются для получения визуального изображения. Такую схему начали применять гораздо ранее других методов записи радиоголограмм, и поэтому она разработана более глубоко, чем системы без сканирования. Система со сканированием изображена на рис. 46. Эта установка работает на волне $\lambda=4{,}3$ *мм*. Колебания излучаются клистроном мощностью 750 *мвт*. Распределение электромагнитного поля сканируется в пределах круговой апертуры диаметром 75 *см* по спиральной развертке. Фотографическая запись голограммы осуществляется с помощью электронно-лучевой трубки, по экрану которой двигается пятно с модулируемой яркостью, повторяющее движение приемного рупора. По схеме, изображенной на рис. 46,*б*, с полученной круговой голограммы восстанавливается изображение предмета.

В отличие от индукционных искателей металлических предметов голографическое радиовидение позволяет определить не только наличие предмета, но и распознать предмет по его форме. Поэтому радиовидение с помощью голографии считается наиболее перспективным методом для распознавания малых предметов, находящихся в местах, недоступных для визуального наблюдения.

Радиолокационные системы с голографической обработкой информации

Применение методов голографии в радиотехнике привело к созданию радиолокационных систем, в которых полученная информация формируется и записывается в виде голограмм для дальнейшей обработки этой информации в оптическом диапазоне. На основе этих методов появились устройства синтезирования апертуры в радиолокационных станциях бокового обзора, системы для получения изображений вращающихся объектов и устройства формирования диаграммы направленности антенных решеток.

Разрешающая способность радиолокационных станций определяется шириной диаграммы направленности: чем уже диаграмма, тем больше разрешение. С другой стороны, чем уже диаграмма направленности, тем больше должны быть размеры антенны при той же рабочей длине волны. Для того чтобы в диапазоне радиоволн, используемых в радиолокационных станциях, получить разрешение по азимуту, сравнимое с разрешением аэрофоторазведывательной аппаратуры, потребовалось бы применять антенны огромных разме-

ров: разрешение по азимуту при работе на частотах около 10 Ггц, эквивалентное по величине разрешению в оптическом диапазоне волн, можно получить, если увеличить размер антенны примерно в $2\times\times10^4$ раз. Чтобы получить, например, разрешение, которое имеет

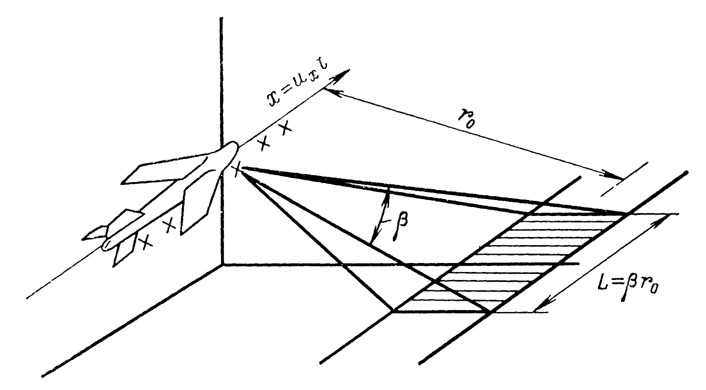


Рис. 47. Зондирование поверхности земли самолетной радиолокационной станцией с синтезированной апертурой.

оптическая система с апертурой в 10 *см*, радиолокационная антенна должна иметь длину около 2 000 *м*.

Таким образом, можно было бы прийти к выводу, что качество изображения в радиолокационных системах всегда значительно хуже,

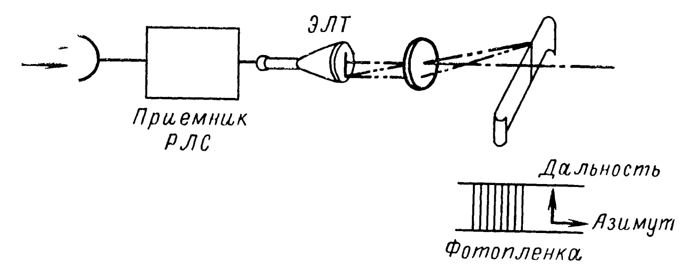


Рис. 48. Схема устройства записи голограммы на фотопленку.

чем в системах, использующих фотосъемку. Однако это не так. Радиолокационные станции с синтезированной апертурой позволяют получить разрешение по азимуту (в направлении, перпендикулярном траектории полета самолета) ничуть не хуже, чем системы аэрофотосъемки. Это обеспечивается путем голографической обработки сигналов, принимаемых антенной, имеющей сравнительно небольшие размеры. Радиолокационная станция, размещенная на самолете, перемещается вдоль прямолинейной трассы и непрерывно излучает следующие один за другим радиоимпульсы (рис. 47). Благодаря высокой стабильности по частоте сигнал от генератора остается когерентным в течение достаточно длительного периода времени, за

которое самолет пролетает несколько сотен и даже тысяч метров. Принятый антенной сигнал комбинируется в специальном устройстве, интерференционном корреляторе, с опорным сигналом и результирующий сигнал отображается на экране электронно-лучевой трубки и затем фотографируется на пленку. На рис. 48 представлена схема записи сигналов. В результате получают голограмму, где вдоль пленки записана информация о просмотренной местности в азимутальном направлении. (В поперечном направлении записывается информация о дальности, полученная обычным путем, т. е. по величине задержки импульса.) Эта голограмма восстанавливается в видимом свете с помощью оптической системы, обычно используемой в опти-

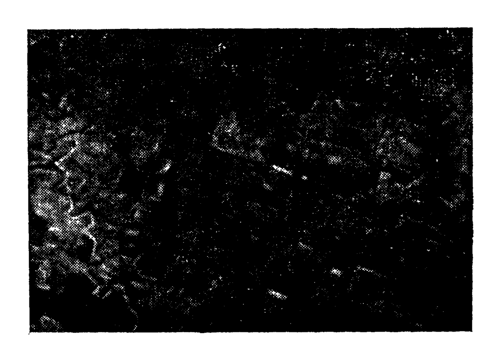


Рис. 49. Изображение земной поверхности в радиолокационной станции бокового обзора после оптической обработки.

ческой голографии. Однако применяемая в ней система линз отличается сложностью, так как надо обеспечить компенсацию искажений, возникающих в результате того, что информация о картине местности принимается радиолокационной станцией при боковом обзоре, а восстановленное изображение желательно видеть в плане.

На рис. 49 представлено изображение, полученное при восстановлении голограммы участка земной поверхности. На рисунке видны тени, как от солнца, что объясняется облучением данной местности радиосигналами сбоку. Эта особенность формирования изображения в перспективном виде характерна для радиолокационных станций бокового обзора.

Как видим, решение проблемы получения высокого разрешения без существенного увеличения размеров антенны достигается определенной ценой: вместо большой, практически невыполнимой антенны теперь необходимо иметь сложное устройство запоминания и обработки сигналов, которое фактически должно выполнять задачу, обычно решаемую антенной. Таким образом, одна часть радиолокационной системы упрощается за счет другой. Тем не менее, в самолетных радиолокационных станциях такое решение проблемы дает существенные преимущества.

Радиоголографические устройства наблюдения вращающихся объектов близки по основному принципу построения радиолокационным станциям бокового обзора. Назначение их — получить изобра-

жение вращающихся объектов с высоким разрешением элементов на поверхности объекта.

Действительно, можно провести прямую аналогию между принципом синтезирования апертуры в радиолокационных станциях бокового обзора и методом наблюдения вращающихся объектов. Для этого достаточно представить, что самолетная антенна находится в состоянии покоя, а наблюдаемый участок земной поверхности вращается. При периодическом излучении импульсных сигналов отраженные сигналы будут меняться в зависимости от характера вращения объекта вокруг оси. Если эти сигналы записать на фотопленку с помощью изображенной на рис. 48 системы, то получится

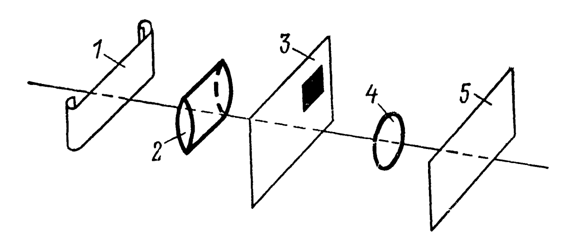


Рис. 50. Оптическая схема устройства для получения изображений вращающихся объектов.

1 — фотопленка; *2* — цилиндрическая линза; *3* — пространственный согласованный фильтр; *4* — сферическая линза; *5* — плоскость изображения.

голограмма, при восстановлении которой через компенсирующую искажения оптическую систему получим изображение вращающегося объекта. Оптическая система для получения изображения вращающегося объекта представлена на рис. 50.

Одним из наиболее впечатляющих примеров получения изображения вращающихся объектов является наблюдение поверхности Венеры, выполненное лабораторией реактивных двигателей Калифорнийского технологического института (США). Радиолокационная станция работала на волне 12,5 *см*, длительность сигнала составляла 51,1 *мсек*. Отраженные сигналы, записанные на магнитофонную ленту, при воспроизведении на экране электронно-лучевой трубки перезаписывались на фотопленку таким же образом, как в радиолокационной станции бокового обзора. Затем фотографическая запись обрабатывалась с помощью методов голографии. В полученном изображении разрешение по дальности составляло примерно 15 *км*, а в поперечном направлении — около 180 *км*. Такое разрешение при исследовании Венеры не удается получить пока никакими другими методами.

Голографический метод формирования диаграмм направленности в фазированных антенных решетках представляет собой несколько иной способ использования синтезированных апертур в радиолокации. Фазированная антенная решетка представляет собой набор приемных антенных элементов, с выхода которых принимаемые сигналы непосредственно не суммируются, а подаются раздельно на систему обработки, которая может быть выполнена различными способами. Так, сигналы могут быть предварительно сдвинуты по фазе в ли-

нейных фазовращателях на величину, прогрессивно увеличивающуюся (например, на 10°), начиная с левого крайнего элемента. При суммировании сигналов с выходов фазовращателей образуется приемная диаграмма направленности, отклоненная на некоторый угол относительно оси антенной системы; если же фазовый сдвиг не вводится, то максимум диаграммы направленности оказывается направленным точно по оси (перпендикулярно плоскости решетки элементов).

Такой способ формирования диаграмм направленности называется формированием лучей фазированной антенной решетки. Путем управления фазовращателями лучи решетки устанавливаются в любое заданное направление, т. е. осуществляется так называемый процесс наведения лучей. Сигналы с выхода антенных элементов могут быть одновременно поданы на несколько систем формирования лучей. Каждая система отклоняет луч на свой определенный угол. В результате одновременно образуется (в отличие от обычных антенных решеток) несколько приемных лучей в различных направлениях.

Принимаемые каждым антенным элементом сигналы записываются на фотопленке или на другом материале, который может использоваться в качестве входного транспаранта оптической системы. Записанный таким способом транспарант облучается когерентным светом и при помощи оптической линзы выполняется преобразование Фурье.

Таким образом, все пространство зоны действия антенной решетки отображается в эквивалентное оптическое пространство. Закономерности отображения аналогичны тем, которые имеются в радиолокационных станциях бокового обзора.

Процесс преобразования принимаемых сигналов для записи их на фотопленку может осуществляться различными способами. Например, сигналы можно отобразить на экране электронно-лучевой трубки, а затем переснять.

Каждая точка записи на фотопленке может характеризовать сигнал, принимаемый элементом решетки в данный момент времени или за некоторый отрезок времени, если используется монохроматический сигнал. В случае одномерной решетки, когда требуется представить сигнал с выхода каждого элемента в виде функции времени, одно направление в плоскости пленки (например, ширину) можно использовать для записи по оси x, а другое (длину) — для записи временны́х изменений. Это приводит к многоканальной системе, в которой в одном направлении осуществляется формирование лучей, а в другом — выполняется или фильтрация сигналов (как функция времени), или взаимная корреляция их с другим сигналом, или какой-либо другой вид обработки.

Голографические методы могут быть использованы не только в случае линейных или плоских решеток. Процесс записи сигналов является весьма гибким и позволяет, в частности, изменять геометрию системы. Например, круговую решетку в процессе записи можно трансформировать в линейную. Система с фазированными антенными решетками может быть как активной, так и пассивной. В общем случае когерентная связь между источником излучения и эквивалентным «опорным сигналом» в приемнике не требуется; отсутствует также необходимость в когерентности между излучателями в пространстве объектов. Такой гибкости, как правило, в обычной оптической голографии не существует.

ДРУГИЕ ВИДЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГОЛОГРАФИИ

Акустическая голография

До возникновения голографии существовали различные методы преобразования звуковых колебаний в видимые с помощью акустических детекторов. С появлением голографии эти методы и устройства преобразования звука в видимое изображение стали применяться для преобразования картины интерференции звуковых волн в интерференционные картины оптического диапазона. На этой основе и возникла акустическая голография.

Голография внесла в область создания акустических изображений новые плодотворные идеи, которые стимулировали развитие

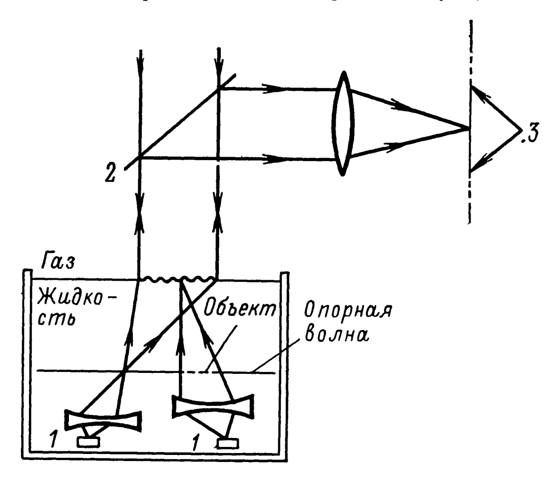


Рис. 51. Голографическая система, создающая на поверхности жидкости голограмму Фурье.

ультразвуковых камер и локаторов. Ультразвуковые камеры представляют собой воспроизводящие устройства, где ультразвуковое (УЗ) изображение, получаемое на пространственном детекторе, преобразуется в видимое изображение. Рабочая частота ультразвука в таких камерах обычно лежит в диапазоне нескольких мегагерц. Подобные устройства часто используются для испытаний образцов без их разрушения, а также в медицинской диагностике.

В звуковых локаторах используются основные принципы радиолокационной техники. Эти системы предназначены для решения сложных задач поиска и наблюдения объектов под водой. Однако область их применения не ограничивается морскими исследованиями. Звуковые локаторы, особенно высокочастотные, так же как и УЗ камеры, используются для диагностики и испытаний без разрушения образца.

Акустические источники в большинстве своем когерентны и их нетрудно приспособить для целей голографии. В этом одна из причин возрастающей заинтересованности к акустической голографии.

Кроме того, все пространственные детекторы интенсивности звуковых колебаний, пригодные для получения обычных акустических изображений, в принципе годятся и для голографии. Среди этих детекторов наибольшее распространение получили детекторы, основанные на использовании деформации поверхности жидкости звуковой волной, поскольку они позволяют избежать процессов промежуточной обработки.

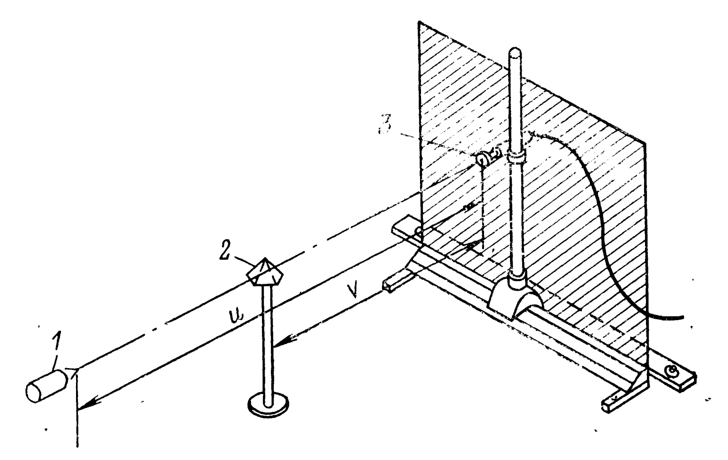


Рис. 52. Схема записи акустической голограммы методом сканирования волнового поля.

1 — источник звука ВЧ; *2* — исследуемый объект; *3* — микрофон.

Принцип их работы основан на том, что звуковая волна, падающая на поверхность жидкости, оказывает на нее звуковое давление, которое деформирует поверхность. Отраженный от деформированной поверхности свет подвергается пространственной фазовой модуляции. Таким образом, производится преобразование информации, которую несет звуковая волна, в пространственную модуляцию света.

На рис. 51 представлена схема безлинзовой голографической системы с использованием в качестве пространственного детектора поверхности жидкости. Объект облучается УЗ преобразователем *1*, который располагается таким образом, чтобы на воде в виде деформации ее поверхности получилась интерференционная картина, представляющая преобразование Фурье функции объекта. Если теперь осветить поверхность когерентным светом, отраженный свет будет пространственно промодулирован деформациями поверхности. Отразившись от расщепителя пучка *2*, после прохождения линзы световой поток создаст видимое изображение объекта *3*.

Сведения об акустическом поле можно также получить, механически перемещая микрофон в интерференционном объеме (акустическом поле). На рис. 52 приведена установка для получения акустических голограмм методом сканирования микрофоном. Подобный способ требует длительного времени и оказывается очень полезным при большом поле сканирования, когда не требуется высокой скорости измерений. Значительно более высокую скорость получения

информации об интерференционном акустическом поле удается получить в случае применения решетки акустических или пьезоэлектрических детекторов со сканированием электронным пучком. Существует также метод, использующий деформацию поверхности твердого тела и сканирование ее лазерным лучом.

Метод сканирования акустического поля одним звукоприемником принципиально ничем не отличается от подобного метода в радио-

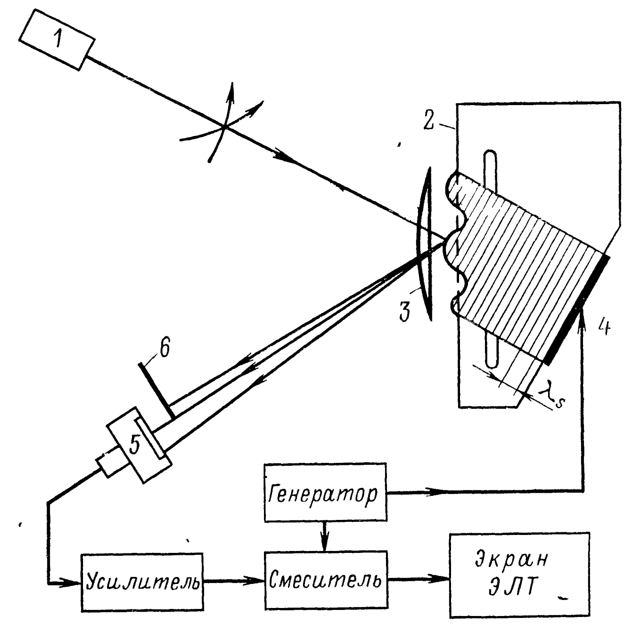


Рис. 53. Схема записи голограммы путем сканирования лазерным лучом деформированной поверхности твердого тела.

1 — лазер; *2* — отражающая пленка; *3* — линза; *4* — УЗ преобразователь; *5* — фотодиод; *6* — ножевая диафрагма.

видении. Вместо радиодетектора здесь используется микрофон или гидрофон (если сканируется акустическое поле в жидкости). Решетка акустических детекторов также имеет свою аналогию в радиовидении. Использование же метода деформации поверхности твердого тела и сканирования ее лазерным лучом не имеет аналогов и поэтому рассмотрим его подробнее.

Если поместить акустически прозрачную тонкую пленку в интерференционный объем, образуемый звуковыми волнами, то ее поверхность деформируется в соответствии с распределением акустических волн в плоскости пленки На рис. 53 представлена система, использующая данный метод. Отражающая свет тонкая пленка деформируется под воздействием волн, создаваемых УЗ преобразователем, который возбуждается электрическими колебаниями от генератора. На поверхности пленки образуется рельеф. Сканирующий поверхность

пленки лазерный луч считывает информацию о ее локальной деформации под воздействием звуковой волны в виде фазовой модуляции. Линза проектирует отраженный световой пучок на фотодетектор. Детектор, состоящий из фотодиода и расположенной перед ним ножевой диафрагмы, преобразует фазовую модуляцию лазерного луча в амплитудную и дает на выходе сигнал, пропорциональный величине деформации поверхности. Этот сигнал затем обрабатывается и формирует на экране электронно-лучевой трубки голограмму. Для восстановления оптического изображения можно воспользоваться фотоснимком этой голограммы с экрана ЭЛТ.

За рубежом первой серийно выпускаемой голографической установкой, предназначенной для задач неразрушающих испытаний и медицинских обследований, явилась система американской фирмы

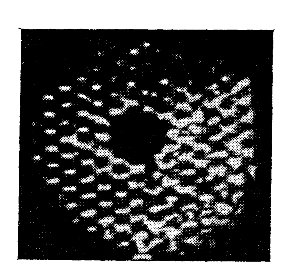


Рис. 54. Восстановленное изображение сотовой структуры с дефектом в середине.



Рис. 55. Восстановленное с акустической голограммы изображение предплечья руки человека.

Holosonics, основанная на методе голографирования сфокусированных изображений с использованием рельефа деформированной поверхности жидкости. На рис. 54 изображено полученное с помощью этой системы акустическое изображение сотовой структуры с дефектом в середине. Как и испытания без разрушения образца, медицинская диагностика принадлежит к числу областей потенциального применения методов акустической голографии, поскольку здесь имеется реальная возможность наблюдения таких мягких тканей, как железы, кровеносные сосуды, опухоли и т. д., которые нельзя увидеть с помощью рентгеновских лучей. На рис. 55, например, представлено изображение предплечья руки человека, полученное с помощью установки фирмы *Holosonics.*

Поскольку методы акустической голографии включают и получение оптических голограмм, здесь возможно осуществить сравнение объекта с эталоном, используя технику оптимальной оптической фильтрации. Поэтому акустическая голография позволяет более эффективно производить общую диагностику заболеваний и неразрушающий контроль, чем методы рентгеноскопии. Широкое применение акустической голографии является лишь вопросом времени,

так как это сулит не только облегчение, но и автоматизацию диагностики.

Одним из интереснейших приложений акустической голографии является сейсмическая голография. Эта область акустической голографии имеет дело с длинными акустическими волнами (от 10 до 300 *м*).

Основные компоненты сейсмических систем аналогичны компонентам других систем, применяемых в акустической голографии, однако их геометрические размеры гораздо больше. Источники акустической энергии должны излучать под землей мощность в несколько киловатт.

Интерпретация голографических данных о столь сложной среде, как Земля, связана со значительно большими трудностями, чем те, которые встречаются в однородных средах (например, воздухе, воде и т. д.). Неоднородности земной коры, начиная с изменений, обусловленных различными геологическими формациями и кончая макроскопическими изменениями физических свойств в пределах самих формаций, усложняют характер распространения упругих волн. В зависимости от состава пород меняется скорость распространения волн, и при переходе из одной породы в другую возникает отражение волн. Эти явления нарушают когерентность сейсмических волн и вызывают появление шумов.

Ряд упомянутых трудностей аналогичен тем, которые встречаются при обычной сейсмосъемке структуры земной коры, основанной на отражении импульсных сигналов. Разработка сложных процессов обработки сигналов и методов фильтрации позволила интерпретировать, казалось бы, совершенно бессмысленные сейсмограммы и получать на их основе реальные вертикальные разрезы Земли. По аналогии с этими результатами можно ожидать, что усовершенствование методов голографической обработки позволит осуществить наблюдение на больших площадях. Первый эксперимент по голографической съемке Земли был проведен в Англии в 1969 г. Источником энергии служил механический вибратор с частотой 90 *гц*, а вместо регистрации на большой площади использовалась линия длиной 1 305 *м*, вдоль которой на удалении 7,5 *м* друг от друга располагались геофоны. С помощью методов оптической фильтрации удалось определить положение отражающего слоя на глубинах до 750 *м*.

Идея подводного видения методами голографии, в основном, аналогична идее радиовидения. Акустическая голография позволяет получать при довольно большом поле зрения хорошее изображение подводных объектов, на которые относительно слабо влияют турбулентность и замутненность воды. Система подводного видения, разработанная американской фирмой *Bendix,* показана на рис. 56. Она содержит источник звука, приемную решетку, устройства обработки сигналов и устройство восстановления изображения. В качестве излучателя используется небольшая сферическая оболочка из пьезокерамики, в которой возбуждаются колебания. Приемной решеткой служит плоская матрица, образованная из пластинок цирконата-титаната свинца, укрепленных на акустическом поглотителе. Элементы расположены на расстоянии 4,5 длин волн друг от друга, что позволяет получить необходимую апертуру. Устройство для обработки сигналов в системе одновременно выдает всю информацию о голограмме. Сигнал, принимаемый каждым отдельным элементом матрицы, смешивается с опорным сигналом, интегрируется в течение

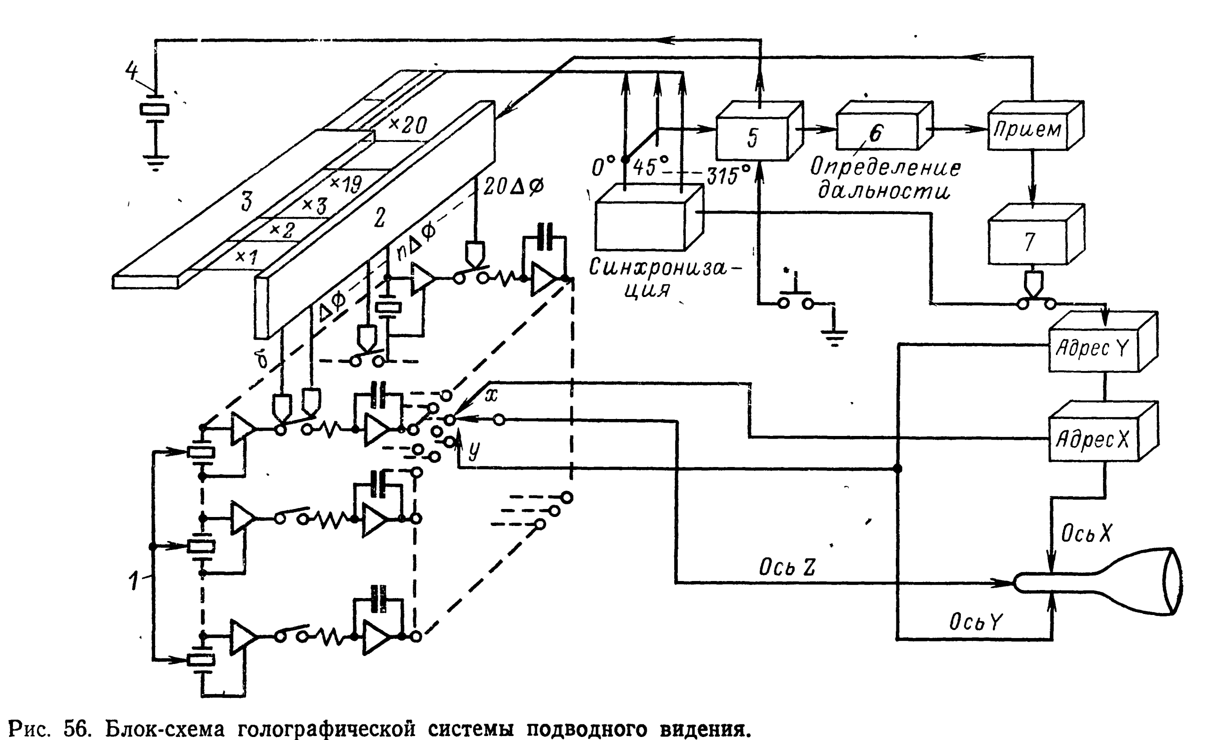


Рис. 56. **Блок-схема голографической системы подводного видения.**

1 — приемная решетка; *2* — вентиль опорного сигнала; *3* — декодер опорного сигнала; *4* — акустический излучатель; *5* — переключатель прием—передача; *6* — определитель дальности; *7* — блок воспроизведения.

заданного интервала времени и хранится в виде определенного уровня напряжения. Эта информация представляется в виде голограммы, с которой восстанавливается изображение.

Заметим, что в последней рассмотренной акустической системе опорная волна не создается с помощью акустических колебаний, а имитируется электронным способом. Эта одна из особенностей акустической голографии, которая намного упрощает голографический процесс и поэтому широко используется в практике.

Голографическая интерферометрия

Традиционный метод физической оптики — интерферометрия, так же как и голография, имеет дело с интерференционными явлениями. Поэтому не удивительно, что развитие методов голографии привело к появлению нового направления — голографической интерферометрии. Суть ее заключается в следующем.

Если поместить голограмму на то же самое место, где она экспонировалась, а предмет убрать, то, как мы уже хорошо знаем, восстановится световая волна, рассеивавшаяся предметом во время записи голограммы. Если же предмет не убирать, то можно получить две волны: идущую непосредственно от объекта и восстановленную голограммой. Эти волны когерентны и могут интерферировать, однако если предмет расположен точно в том же месте, что и при записи голограммы, то фронты этих двух волн совпадают и они не интерферируют.

Если теперь слегка изменить положение предмета или деформировать его, то в рассеянном предметом волновом фронте произойдут изменения. Это немедленно скажется на виде наблюдаемой картины — восстановленное изображение предмета окажется перерезанным полосами, характеризующими изменение состояния предмета.

Интерферометрия является методом, применяемым для точного измерения и сравнения длин волн, для измерения очень малых расстояний или трещин, для обнаружения дефектов или неоднородностей в оптических средах, для определения показателей преломления различных материалов и т. д. В основе классической (доголографической) интерферометрии лежит сравнение волновых фронтов световых пучков, идущих по разным оптическим путям и образующим интерференционную картину. Например, в интерферометре Тваймана — Грина на пути одного из пучков устанавливается исследуемая линза, а на пути другого — эталонная и по полученной интерференционной картине судят об отличии исследуемой детали от эталонной. В связи с этим в классической интерферометрии объект исследований должен обязательно иметь совершенную оптическую поверхность, чтобы можно было без больших затруднений сформировать эталонный пучок.

Голографическая интерферометрия позволяет исследовать предметы неправильной формы и даже диффузно отражающие. Отступления от правильной поверхности предмета на интерференционной картине не скажутся: обе интерферирующие волны будут в одинаковой степени ими искажены, так как эталонную световую волну создает сам объект. Интерференционная картина будет определяться только теми изменениями, которые произошли с объектом. По этой же причине в голографической интерферометрии снимаются требования к качеству оптики, поскольку любые несовершенства оптических деталей не имеют значения, так как они в равной степени искажают обе интерферирующие волны.

Возможности, которые дает голография при наблюдении сложных объектов, позволяют успешно применять ее при проведении интерферометрических экспериментов с различными материалами, например бетоном, скальными породами, металлическими конструкциями, радиоэлектронными элементами, а также для изучения различных физических явлений, таких, как направление потоков, ударные волны в аэродинамических трубах и т. п. С помощью голографии можно даже следить за ходом химических реакций и процессом диффузии.

Наибольшее распространение получили следующих три метода голографической интерферометрии: интерферометрия в реальном масштабе времени (или мгновенная интерферометрия), интерферометрия с двойной экспозицией и интерферометрия с усреднением по времени (или с многократной экспозицией).

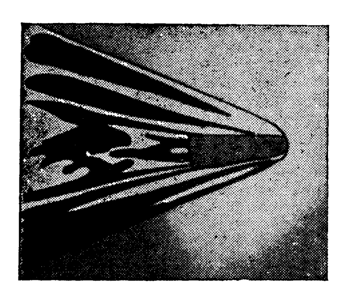


Рис. 57. Голографическое изображение ударной волны летящей пули, полученное по методу двойной экспозиции.

При первом методе сначала получают голограмму объекта в его исходном (невозмущенном) состоянии, а затем по наблюдаемой интерференционной картине исследуют динамику происходящих с объектом изменений в реальном масштабе времени либо фиксируют эти изменения в произвольный момент времени в виде интерферограмм. Серьезным недостатком такого метода является необходимость точнейшего возвращения голограммы в то же положение, в котором она находилась во время экспозиции, что не всегда возможно осуществить.

При интерферометрии с двойной экспозицией на одной голограмме регистрируются два состояния объекта: одно до, второе после изменения. Получаются наложенные друг на друга две интерференционные картины. В восстановленном изображении отражаются изменения объекта, происшедшие между первой и второй экспозициями. Этот метод, в основном, используется при исследовании быстродвижущихся объектов и быстропротекающих явлений. Так, например, с помощью рубинового лазера, излучающего настолько короткие импульсы, что за время их длительности объекты можно считать неподвижными, можно получить детальные изображения ударных волн и турбулентного следа летящей пули (рис. 57) и т. п.

При интерферометрии с двойной экспозицией можно зафиксировать только изменения, произошедшие между двумя экспозициями. Для этого достаточно во время одной экспозиции ввести в предметный или опорный пучок полуволновую разность хода: восстановленные волны придут в противофазе и скомпенсируют друг друга. При восстановлении изображения такой дифференциальной голограммой неизменившиеся части объекта не будут видны.

Третий метод основан на использовании для регистрации движения объекта длительной экспозиции и применяется при изучении быстрых вибраций. Этот метод аналогичен фотографированию с большой экспозицией качающегося маятника. Если, например, фотографировать с большой выдержкой быстроидущую автомашину, то от нее

получается только размытый след, фотографирование же качающегося маятника даст различимое изображение лишь в крайних его положениях. Такое явление объясняется, конечно, тем, что маятник в этих точках находится более длительное время, чем в других точках описываемой им дуги. Запись на фотоэмульсию в этих положениях, естественно, будет более плотной. Аналогичным образом и на голограмме, снятой с большой выдержкой (более продолжительной, чем период колебаний), волновые фронты будут зарегистрированы с большей плотностью в двух крайних положениях колеблющегося объекта.

Вполне естественно ожидать, что восстановленный волновой фронт голограммы, снятой с усреднением по времени, приближенно

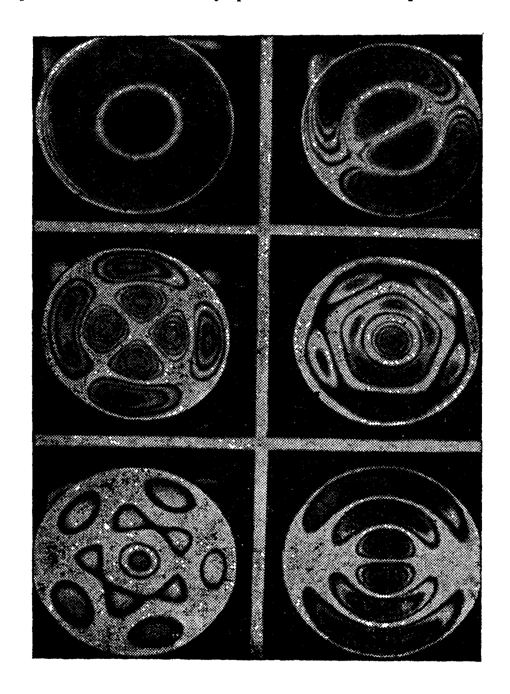


Рис. 58. Интерферограммы колеблющегося на разных частотах дна жестяной банки, снятые с усреднением по времени.

может представить волновой фронт голограммы с двойной экспозицией, на которой движущийся объект зарегистрирован в двух крайних его положениях. По таким голограммам обычно изучают распределение амплитуд вибраций объектов сложной формы. На рис. 58 приведены голографические интерферограммы колеблющегося на разных частотах дна жестяной банки. При интерферометрии по этому третьему методу полезная информация содержится только в интерференционных картинах, соответствующих крайним положе-

ниям вибрирующего объекта. Вредная же засветка фотопластинки, происходящая во время нахождения объекта в промежуточных положениях, создает фон, который уменьшает контраст интерференционных полос.

Для исключения влияния этого эффекта применяется стробоскопический метод исследований вибраций, суть которого заключается в том, что с помощью стробоскопического диска голограмма экспонируется лишь в моменты времени, соответствующие крайним положениям вибрирующего объекта.

Голографические методы исследования вибраций позволяют изучать вибрации деталей и приборов, например акустических преобразователей, ультразвуковых излучателей, вибростендов, исследовать возникающие под воздействием ультразвука поверхностные волны и по распределению узлов и пучностей в них обнаруживать внутренние дефекты деталей. Кроме того, много новых возможностей дает голографическая интерферометрия для изучения импульсных и стационарных фазовых неоднородностей, имеющих место в газовых потоках, пламени, плазме, при взрывах и т. п. Особенно ценно здесь то, что исследования можно производить, когда изменяющаяся среда находится в сосуде с оптически несовершеннными стенками, чего методами классической интерферометрии сделать невозможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели ряд примеров применения голографии в приборах и устройствах, имеющих отношение к различным областям науки и техники. Этим, однако, не ограничиваются все вопросы голографии и ее применения. Существует ряд областей, где эффект от применения голографии в настоящее время не выяснен до конца. Например, в технологии изготовления интегральных микросхем методом фотолитографии предполагается вместо сложных и дорогостоящих объективов использовать голограммы с записанными на них рисунками микросхем. Восстанавливая и проектируя действительное изображение на светочувствительный слой (фоторезист), можно получить тот же эффект, что и при проектировании через объектив трафарета. Технологов здесь привлекают два момента: нечувствительность голограмм к небольшим нарушениям ее структуры (трещинам, царапинам, пыли на поверхности) и возможность получения практически безаберрационного изображения на большом поле. Однако применение голографического метода в фотолитографии сопряжено с рядом технических трудностей, сдерживающих в настоящее время его широкое использование в промышленности.

Не ясны до конца перспективы использования голограмм в микроскопии, несмотря на то, что появлению первых голограмм предшествовали работы Габора по созданию голографического микроскопа. Сейчас считается целесообразным использовать голограммы только в фазовой микроскопии, когда необходимо обнаружить фазовую модуляцию световой волны, прошедшей через прозрачный (фазовый) объект. Используемые для этой цели интерференционные микроскопы достаточно сложны и дороги. Предполагается, что голографический вариант интерференционного микроскопа будет достаточно дешевым и простым в обращении.

В последнее время существует тенденция заменять в некоторых случаях оптические элементы голограммами. Известно, что фокусирующие свойства зонных решеток (голограмм точечных источников когерентного света) позволяют использовать их в качестве линз в когерентном свете, а голограмма двух плоских когерентных оптических фронтов является идеальной дифракционной решеткой, совсем не дающей «духов», (дифракционных порядков выше первого), в отличие от обычных дифракционных решеток, нарезанных на делительной машине. С помощью голографических методов можно получить оптические элементы, по своим свойствам аналогичные волоконнооптическим устройствам. Такие элементы имеют все свойства оптического волокна, но отличаются от него простотой изготовления. Методами голографии можно изготовить комплекс оптических элементов или придавать оптическим элементам свойства, которые им придать невозможно при обычном изготовлении. Можно привести

еще множество примеров из этой области голографии, получившей название голографической оптики. Эта область применения голографии активно развивается, хотя возможности и эффективность использования голографической оптики ограничены требованиями когерентности освещения.

В книге также не получили освещения вопросы цветной голографии, с помощью которой формируются объемные цветные изображения, поражающие своей реалистичностью, методы получения голограмм в некогерентном свете и устройства, использующие такие голограммы, проблемы копирования голограмм и т. п. Подобные вопросы и примеры, по мнению авторов, мало что добавляют для понимания возможностей голографии, хотя и представляют большой интерес для специалистов, связанных с этими областями.

Голографические методы можно встретить не только в сугубо технических устройствах. С помощью голографических методов делаются попытки объяснить ряд явлений, происходящих даже в далеких от техники областях. В частности, делаются попытки объяснить точность гидролокационного органа дельфинов, подходя к нему с позиции голографического гидролокатора, а устройство мозга человека — с точки зрения принципов ассоциативного голографического запоминающего устройства.

Голография — сравнительно молодая отрасль науки и техники. Голография пока еще не имеет стройной общей теории, хотя и существуют попытки обобщить накопленный теоретический и экспериментальный материал. Отсутствие стройной теории голографии не дает возможности произвести строгую классификацию голографических приборов и устройств. Предложенная в книге классификация, в основном, следует не методам голографии, а традиционным областям науки и техники.

В книге используются термины, получившие наибольшее распространение в отечественных и зарубежных журналах и книгах, посвященных голографии. Термины, не относящиеся к голографии, рассчитаны на массового читателя, знакомого с основами физики, химии и радиотехники.

СОДЕРЖАНИЕ

ЮРИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ ГОРОХОВ
ЛЕОНИД НИКОЛАЕВИЧ НЕПЛЮЕВ

ГОЛОГРАФИЯ В ПРИБОРАХ И УСТРОЙСТВАХ

Редактор И. В. Лебедева
Редактор издательства Т. В. Жукова
Технический редактор Т. А. Маслова
Корректор А. К. Улегова

Сдано в набор 23/I 1974 г. Подписано к печати 26/VII 1974 г.
Т-12877 Формат $84\times108^{1}/_{32}$ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 4,2 Уч.-изд. л. 5,37
Тираж 20 000 экз. Зак. 648 Цена 22 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Цена 22 коп.